

Forschungsbericht BWPLUS

## **Erweiterung der Wasserstoff-Infrastruktur im Industriegebiet Freiburg Nord**

von

Christopher Voglstätter  
Andreas Nübling  
Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg

Armin Dietsche  
Ulrich Hochberg  
Hochschule Offenburg

Markus Haas  
Tim Stocker  
Julia Zähr  
Sick AG

Förderkennzeichen: BWH 14004 - BWH 14006

Die Arbeiten des Programms Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung werden mit  
Mitteln des Landes Baden-Württemberg gefördert

Dezember 2016

# **ERWEITERUNG DER WASSERSTOFF- INFRASTRUKTUR IN FREIBURG**

## Abschlussbericht



# ERWEITERUNG DER WASSERSTOFF- INFRASTRUKTUR IN FREIBURG

## Abschlussbericht

**Christopher Voglstätter**  
**Andreas Nübling**

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE  
in Freiburg

**Armin Dietsche**  
**Prof. Ulrich Hochberg**

Hochschule Offenburg

**Markus Haas**  
**Tim Stocker**  
**Dr. Julia Zähr**

Sick AG

Förderkennzeichen: BWH 14004 - 14006  
Projektpartner: Fraunhofer ISE (Koordinator), Hochschule Offenburg, SICK AG  
Rev. 7 vom 06.10.2016

## Kurzbeschreibung der Projektergebnisse

Das Fraunhofer ISE hat im Rahmen dieses Projektes die hauseigene Wasserstoff-Tankstelle um einen zweiten Hochdruckspeicher, einen zweiten Mitteldruckverdichter, zwei Mengensensoren und eine Elektrolyse-Leistungssteuerung erweitert und die Lüftung im Betriebsmittelraum verändert. Zudem wurde die im Projekt vom Partner Sick entwickelte Gasanalytik in die Tankstelle und die vom Partner Sick entwickelte Mengensensormessung in einen 200kW Elektrolyse-Teststand integriert.

Damit wurde die Betankungskapazität pro Fahrzeug und insgesamt verbessert, die Zuverlässigkeit der Tankstelle erhöht und die Infrastruktur geschaffen, um Langzeituntersuchungen von Gasverunreinigungen, Elektrolyse-Degradation und Wasserstoff-Verlusten an der Tankstelle durchzuführen, sowie einen Feldtest für die entwickelten Komponenten des Partners Sick durchzuführen. Alle Nachrüstungen waren erfolgreich – die Lüftungsanpassung zur Verbesserung der Vorkühlungszuverlässigkeit und Lebensdauer erfüllte jedoch bis zum Projektende nicht die Erwartungen. Bei Messungen mit und für die Hochschule Offenburg wurden zudem mit sehr geringem Mehraufwand Messdaten bezüglich Genauigkeit des vorhandenen Coriolismessers erhoben und verwertet.

Die Hochschule Offenburg hat im Rahmen dieses Projektes ein Funktionsmuster für ein Mengensensormessverfahren an H<sub>2</sub>-Tankstellen entwickelt. Dieses Funktionsmuster wurde an einem ebenso im Projekt entwickelten gravimetrischen Teststand unter Realbedingungen an der H<sub>2</sub>-Tankstelle des Fraunhofer ISE getestet. Die Ergebnisse zeigen, dass Messunsicherheiten im Bereich der Eichfähigkeit (um 1 %) erreicht werden und das Verfahren und die Vorgehensweise des Funktionsmusters damit eine Eichfähigkeit erreichen können. Damit zeigt das von der Hochschule Offenburg in diesem Projekt entwickelte Funktionsmuster bereits in diesem Entwicklungsstadium ein sehr großes Potenzial das noch ungelöste Problem der eichfähigen Wasserstoff-Mengensensormessung zu lösen.

Die Sick AG hat im Rahmen des Projektes das Ziel eine Reinheitsmessung und eine Mengensensormessung für dezentrale Wasserstoff-Erzeugungsanlagen zu entwickeln. Die Qualitätsmessung wurde erfolgreich erstellt und befindet sich seit August im Feldtest an der H<sub>2</sub>-Tankstelle des Fraunhofer ISE.

Für die Entwicklung des Mengensensors wurde zum einen die Eignung eines konventionellen Zähleraufbaus basierend auf dem Ultraschalllaufzeitdifferenzverfahren getestet. Ein 1"-Zähler erwies sich hierbei als nicht geeignet und ein 2"-Zähler wurde in Versuchen bei der PTB mit Wasserstoff (Teststand limitiert auf bis zu 10 m<sup>3</sup>/h) mit einem minimalen Volumenstroms von 5 m<sup>3</sup>/h als geeignet befunden. Außerdem wurden Grundlagenuntersuchungen zu einem alternativen Versuchsaufbau für Anwendungen an Gasen mit hohen Schallgeschwindigkeiten (bspw. Wasserstoff) durchgeführt, die in Versuchen bis zu einer Strömungsgeschwindigkeit von 80 m/s erfolgreich waren.

Im Rahmen des Projektes konnte das ursprünglich angestrebte Ziel der Entwicklung eines eichfähigen Zählers für Wasserstoff-Anwendungen nicht erreicht werden, da zum einen kein entsprechender Versuchsstand verfügbar war und zum anderen der konventionellen Zähler bei geringen Volumenströmen keine ausreichend guten Ergebnisse zeigte. Das innovative Zählerdesign muss für das Ziel eines zulassungsfähigen Gerätes weitere Grundlagenuntersuchungen und daran anschließend eine Geräteentwicklung durchlaufen.

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Motivation / wissenschaftlicher und technischer Stand .....</b>	<b>7</b>
1.1	Ziele / Aufgabenstellung des Projektes .....	8
1.2	Projektstruktur .....	8
<b>2</b>	<b>Kapazitätserweiterung HRS Freiburg, Arbeiten des Fraunhofer ISE .....</b>	<b>10</b>
2.1	Durchgeführte Änderungen an der HRS Freiburg .....	10
2.1.1	Zweiter Hochdruckspeicher .....	11
2.1.2	Zweiter Mitteldruck-Kompressor .....	12
2.1.3	Lüftungsumbau.....	13
2.1.4	Gas-Analytik .....	14
2.1.5	Massedurchflussmesser H2-Tankstelle .....	15
2.1.6	Integration Elektrolyse-Leistungssteuerung.....	15
2.1.7	Ultraschall-Mengenmesser .....	16
2.2	Bewertung der Änderungen.....	17
2.2.1	Zweiter Hochdruckspeicher .....	17
2.2.2	Zweiter Mitteldruck-Kompressor .....	19
2.2.3	Lüftungsumbau.....	20
2.2.4	Gas-Analytik .....	21
2.2.5	Massedurchflussmesser .....	23
2.2.6	Integration Elektrolyse-Leistungssteuerung.....	23
2.2.7	Mengenmesser der Sick AG .....	25
2.3	Messungen mit dem Coriolis-Messer der HRS-Freiburg.....	25
2.4	Arbeiten der ursprünglichen Arbeitspakete .....	28
<b>3</b>	<b>Entwicklung Mengenummessung HRS, Arbeiten der Hochschule</b>	
<b>Offenburg .....</b>	<b>.....</b>	<b>31</b>
3.1	Eichfähige Mengenummessung von Betankungsvorgängen an Wasserstofftankstellen.....	31
3.2	Rahmenbedingungen der Norm SAE J2601.....	31
3.2.1	Grundlagen der SAE J2601 .....	31
3.2.2	Ablauf der Betankung .....	32
3.3	Dynamisches Simulationsmodell zum Berechnen der Volumen- und Massenströme .....	33
3.4	Anforderungen an die Messrichtigkeit nach OIML R139.....	34
3.5	Differenzdruckmessverfahren .....	36
3.5.1	Thermodynamische Grundlagen für die Differenzdruckmessung .....	36
3.6	Werkstoffauswahl.....	37
3.7	Auslegung der Geometrie des Strömungskanals .....	37
3.7.1	Ermittlung des Taillendurchmessers $d_2$ .....	38
3.7.2	Ermitteln des Einlaufdurchmessers $d_1$ .....	39
3.7.3	Positionierung der Druckmessbohrungen .....	40
3.7.4	Auslegung der Druckmessbohrung .....	41
3.7.5	Korrektur des Fehlereinflusses durch die Druckmessbohrung .....	41
3.8	Konstruktion der Messdüse.....	42
3.8.1	Druckmesstechnik .....	43
3.8.2	Temperaturmesstechnik .....	44
3.8.3	Reibungseinfluss auf Temperatur .....	45
3.8.4	Einfluss auf Temperatur $T_2$ durch Wärmeübergang .....	45
3.9	Aufbau des gravimetrischen Teststands (Referenzmesssystem).....	47
3.9.1	Genauigkeit der Referenzmessung .....	48
3.10	Betankungsversuche .....	49
3.11	Diskussion und Ausblick.....	50

<b>4</b>	<b>Entwicklung eichfähige Wasserstoffmessung, Arbeiten der Sick AG .....</b>	<b>52</b>
4.1	Grundlagenermittlung zur Entwicklung einer eichfähigen Wasserstoffmengenmessung basierend auf Ultraschalltechnik (AP 5).....	52
4.1.1	Zielstellung.....	52
4.1.2	Messaufgabe – Herausforderung Ultraschallmengenmessung für Gasmengenmessung .....	53
4.1.2.1	Laufzeitdifferenzmessung.....	53
4.2	Herausforderung Volumenstrommessung an Wasserstoff .....	54
4.2.1	Eignung konventioneller Ultraschallzähler für Messaufgabe .....	55
4.2.1.1	1"-Zähler.....	55
4.2.1.2	2"-Zähler.....	57
4.2.2	Versuchsaufbau: Längerer Messpfad-Zähler .....	58
4.3	Grundlagenermittlung zur Reinheitsmessung von Wasserstoff aus der Elektrolyse / Gasreinigung / Verdichtung (AP2) .....	59
4.3.1	Einführung – Ziele aus dem Antrag .....	59
4.3.2	Qualitätsmessung.....	60
4.3.3	Eingesetzte Messgeräte.....	61
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>63</b>
<b>6</b>	<b>Sonstiges.....</b>	<b>66</b>
6.1	Fortschritte auf diesem Gebiet bei anderen Stellen .....	66
6.2	Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....	66
6.3	Beitrag zu den Zielen des Förderprogramms des Zuwendungsgebers .....	67
6.4	Nutzen / Verwertbarkeit / Konzept Ergebnis- und Forschungstransfer .....	67
6.5	Veröffentlichungen .....	67
<b>7</b>	<b>Quellen / Literaturverzeichnis.....</b>	<b>68</b>

Wasserstoff als Energieträger und nachhaltig erzeugter Kraftstoff für Brennstoffzellen-Fahrzeuge gewinnt zunehmend an Bedeutung in der Debatte um den Umbau unserer Energieversorgung hin zu erneuerbaren Energien (EE). Damit einher rückt die Frage des zukünftigen Aufbaus einer Wasserstoff-Infrastruktur unter Berücksichtigung örtlicher und regionaler Strukturen von EE-Anlagen in den Fokus. Mit Hilfe von Landesmitteln des Wasserstoff-Infrastrukturprogrammes Baden-Württemberg konnte im März 2012 eine öffentliche Wasserstoff-Tankstelle am Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE eröffnet werden. Die Tankstelle erfüllt den „CEP-ready“-Standard und ermöglicht eine Betankung nach Stand der Technik und gültigen Normen. Als einzige Tankstelle in Deutschland zu der Zeit verfügt sie über einen kommerziellen PEM-Elektrolyseur zur onsite-Wasserstoff-Erzeugung.

Mit dem Zuwachs an Fahrzeugen im Freiburger Raum (inzwischen 5 Fahrzeuge, sowie ein Autohaus, das sich den Verkauf von Hyundai ix35 Brennstoffzellen-Fahrzeugen zum Ziel gesetzt hat) sowie die zunehmenden Anfragen aus dem Züricher Raum lassen vermuten, dass die Freiburger Wasserstoff-Tankstelle in Zukunft an Kapazitäts-Engpässe geraten kann. Zudem ist eine Vollbetankung der neuen Fahrzeuge mit größerem Tank aufgrund des kleinen Hochdruckspeichers nicht möglich, was bei den bestehenden Fahrzeugkunden für Frust sorgt. Aus dem Betrieb der Tankstelle heraus haben sich zudem weitere wissenschaftliche Fragestellungen (Wasserstoff-Verlust an der Anlage, Alterung des Elektrolyseurs, Wasserstoff-Qualitäts-Betrachtung) ergeben, deren Bearbeitung durch eine Nachrüstung von einzelnen Komponenten ermöglicht werden soll.

An keiner Wasserstoff-Tankstelle erfolgte zum Zeitpunkt des Berichts eine eichfähige Mengenmessung des abgegebenen Wasserstoffs entsprechend der SAE J2601. Das Konsortium der H2-Mobility-Initiative lies zum Zeitpunkt des Projektes ein Coriolis-Mengenmessgerät auf seine Eignung untersuchen, das Ergebnis der Untersuchungen war jedoch ungewiss, da sowohl bei kleinen Gasdichten als auch - in einem anderen Betriebszustand – bei hohen Drücken gemessen werden muss. Für die breite kommerzielle Einführung der Wasserstoff-Mobilität stellt dies ein Problem dar, das in den nächsten Jahren der Marktvorbereitung gelöst werden muss.

Auch an kleinen dezentralen Wasserstoff-Erzeugungsanlagen war eine eichfähige Mengenmessung zum Zeitpunkt des Projektes nicht verfügbar. Jedoch ist für eine zukünftige Wasserstoff-Wirtschaft und die Versorgung von Wasserstoff-Tankstellen auch eine geeichte Wasserstoff-Mengenmessung für dezentrale kleine Wasserstoff-Erzeugungsanlagen notwendig, um eine eichamtliche zulässige Abrechnung zu ermöglichen.

## 1.1 Ziele / Aufgabenstellung des Projektes

Aus der oben beschriebenen Situation ergeben sich die Ziele des Forschungskonsortiums:

1. Zum einen soll der im Testzentrum erzeugte Wasserstoff nicht unnötig verschwendet werden, sondern stattdessen der Tankstelle als Kraftstoff zugeführt werden. Damit wird eine Kapazitätserweiterung der existierenden Tankstelle ermöglicht, so dass diese auch in Zukunft den steigenden Bedarf gerecht werden kann.
2. Zum anderen werden Grundlagen für eine geeignete Sensorik zur Qualitäts- und Mengenmessung von elektrolytisch erzeugtem Wasserstoff entwickelt, die dann zu einem späteren Zeitpunkt durch eine Prüfbehörde (z.B. Eichdirektion PTB) als eichfähiges Messverfahren abgenommen werden kann. Die industrielle Eignung für den im Projekt typischen Druck und Durchfluss der Wasserstofferzeugung und -speicherung soll nachgewiesen werden.
3. Letztendlich hat sich das Konsortium zum Ziel gesetzt, in einem weiteren Schritt das Konzept einer eichfähigen Mengenmessung für den Einsatzbereich einer Wasserstoff-Abgabe an Tankstellen gemäß SAE TIR J2601 in einem weiten Druck- und Temperaturbereich zu entwickeln

Da sich im Verlaufe des Projektes abgezeichnet hatte, dass das Projektziel 1) nicht im Projektzeitraum erreicht werden kann, wurde das Projektziel 1 in einem Änderungsantrag den Gegebenheiten angepasst und umformuliert in:

1. Durch Maßnahmen zur Erhöhung der Anlagenverfügbarkeit und Zuverlässigkeit an der H<sub>2</sub>-Tankstelle des Fraunhofer ISE soll eine Kapazitätserweiterung der existierenden Tankstelle ermöglicht werden, so dass diese auch in Zukunft dem steigenden Bedarf gerecht werden kann.

## 1.2 Projektstruktur

In Abb. 01: ist die Struktur des Projektes und die Zusammenarbeit zwischen den Partnern dargestellt.

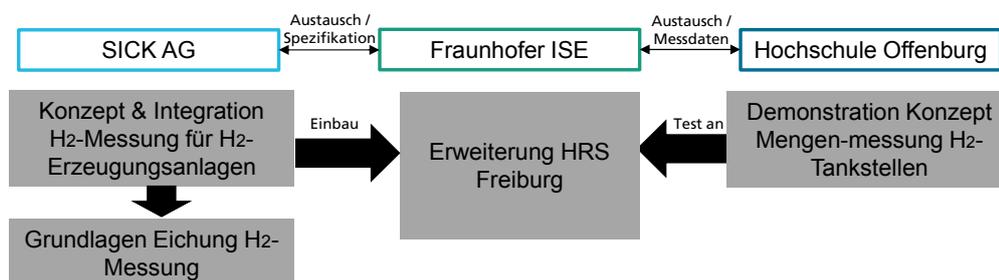


Abb. 01: Projektstruktur

Vor der Projektänderung war die Aufgabe des Fraunhofer ISE eine Erweiterung der bestehenden Elektrolyse-Teststände (bis zu 1MW) um einen Elektrolyse-Zellstapel, eine Gasreinigung, Pufferspeicher und Flaschenabfüllstation zur Abfüllung und Nutzung des überschüssigen Wasserstoffs an der hauseigenen Tankstelle. Zudem sollte die neue Gesamtanlage mit einer Gesamtsteuerung ausgestattet werden und die notwendigen Genehmigungsverfahren durchlaufen werden. Diese Arbeiten wurden jedoch nach der Planungsphase abgebrochen (vgl. Kapitel 1.1)

Stattdessen wurde die Aufgabe des Fraunhofer ISE in die Nachrüstung der institutseigenen Wasserstoff-Tankstelle gewandelt.

---

Motivation / wissenschaftlicher  
und technischer Stand

---

Die Sick AG hatte zur Aufgabe die Reinheits- und Mengenmessung für Erzeugungsanlagen zu entwickeln. Hierfür sollten für die Reinheitsmessung nach einer Recherche entsprechende Geräte beschafft und in ein für die Zielanlage passendes Gesamtkonzept (Messboxen) integriert werden. Ein passendes Mengenverfahren sollte für die Anwendung Wasserstoff adaptiert werden. Das Fraunhofer ISE sorgte zusammen mit der Sick AG für den Einbau der Geräte in die hauseigene Infrastruktur (H<sub>2</sub>-Tankstelle und Teststände) und wird projektnachgelagert Messdaten für mindestens 1 Jahr aus dem Feldtest bereitstellen.

Die Sick AG hatte außerdem die Aufgabe, parallel dazu die Grundlagen für die Eichung der H<sub>2</sub>-Messung zu entwickeln und sollte Messreihen konzipieren, um Sie bei geeigneten Testständen durchführen lassen.

Die Hochschule Offenburg hatte zur Aufgabe, einen Demonstrator für ein alternatives Konzept zur Messung an H<sub>2</sub>-Tankstellen zu entwickeln. Neben theorie- und simulationsgestützter Auslegung, sollte die Hochschule Offenburg einen Demonstrator und einen Teststand entwickeln. Demonstrator und Teststand sollten dann durch Tests validiert und bewertet werden, was durch Messungen von Hochschule Offenburg und Fraunhofer ISE an der H<sub>2</sub>-Tankstelle des Fraunhofer ISE umgesetzt wurde.

Die Koordination des Projektes lag beim Fraunhofer ISE.

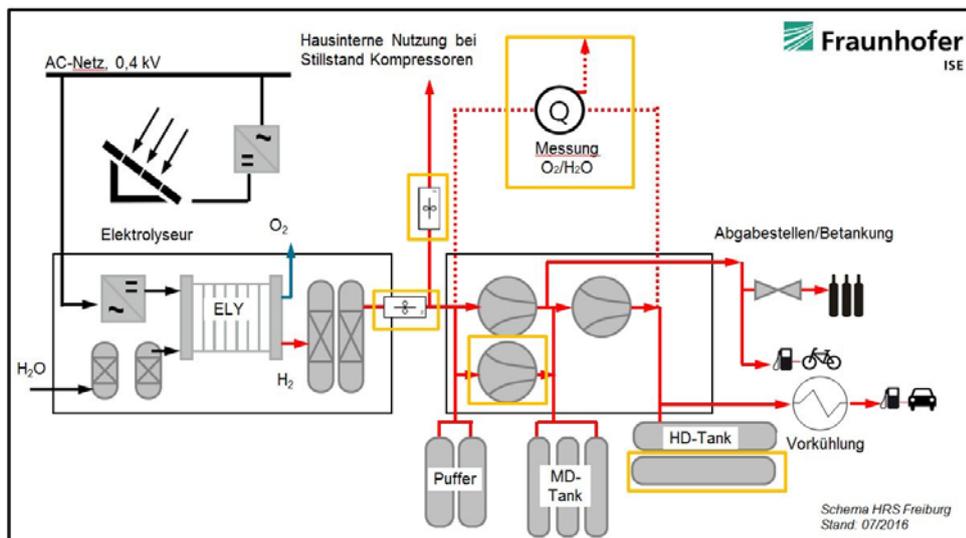
## 2 Kapazitätserweiterung HRS Freiburg, Arbeiten des Fraunhofer ISE

Kapazitätserweiterung HRS  
Freiburg,  
Arbeiten des Fraunhofer ISE

**Autor:** C. Voglstätter und A. Nübling (Fraunhofer ISE)

### 2.1 Durchgeführte Änderungen an der HRS Freiburg

Die Struktur der H<sub>2</sub>-Tankstelle des Fraunhofer ISE inklusive Nachrüstungen ist in Abb. 01: dargestellt. An der H<sub>2</sub>-Tankstelle wird mittels eines PEM-Elektrolyseurs, welcher über PV und das Stromnetz mit Energie versorgt wird, Wasserstoff erzeugt. Der Wasserstoff wird getrocknet und mittels eines druckluftbetriebenen Kompressors auf bis zu 450 bar komprimiert. Dieser Wasserstoff wird in Flaschenbündeln mit bis zu 450 bar (MD-Tank) zwischengelagert. Diese Flaschenbündel dienen als Vorratsspeicher und Quelle für einen weiteren druckluftbetriebenen Kompressor, welcher den Wasserstoff auf bis zu 950 bar komprimiert und im HD-Tank speichert. Für eine Betankung eines Fahrzeuges wird dieser Wasserstoff mittels eines Wärmetauschers während der Betankung auf bis zu -40 °C gekühlt, um eine schnelle Betankung zu ermöglichen. Wird an der H<sub>2</sub>-Tankstelle aktuell kein Wasserstoff benötigt, liefert der Elektrolyseur bei Bedarf Wasserstoff über eine Leitung zu hausinternen Verbrauchern.



**Abb. 02: Schematische  
Darstellung der Tankstelle**

*Nachrüstungen sind orange umrahmt*

Im Rahmen des Projektes „Wasserstoff-Infrastruktur Freiburg“ wurden folgende Nachrüstungen durchgeführt:

- Zweiter Hochdruckspeicher: Durch die Integration eines zweiten, nahezu baugleichen Hochdruckspeichers wurde die gespeicherte Menge an Wasserstoff im Hochdrucktank verdoppelt. Durch den zweiten Speicher soll es möglich sein, größere Fahrzeuge komplett voll zu betanken.
- Zweiter Mitteldruck-Kompressor: Aufgrund von Verschleiß ist der Mitteldruckkompressor mittlerweile der limitierende Faktor für die tägliche Produktionskapazität und die Verfügbarkeit. Durch Nachrüstung eines zweiten Verdichters soll die Verfügbarkeit und die Kapazität der Tankstelle erhöht werden.

- Anpassung Abluft Betriebsmittelraum: Da im Betriebsmittelraum der Tankstelle bei hohen Außentemperaturen sehr hohe Innentemperaturen herrschen und dadurch Bauteile zu Schaden kommen können, wurde die Luftführung in diesem Raum während des Projektes angepasst. Hierdurch wird sich eine Temperatursenkung im Innenraum erhofft.
- Reinheitsmessung: Durch den Projektpartner Fa. SICK wurde im Zuge des Projektes eine Reinheits-/(Gas-)Qualitätsmessung erstellt, welche dann an der Tankstelle integriert wurde. Somit sollen Aussagen über die Qualität des Wasserstoffes getroffen werden.
- Massedurchflussmesser: Um eine Bilanzierung der Tankstelle vornehmen und potenziellen H<sub>2</sub>-Verlust einengen zu können, wurden zwei Massedurchflussmesser an der Tankstelle verbaut. Hierdurch sollen die Verluste quantifizierbar und zeitlich zuordenbar werden.
- Leistungssteuerung: Im Zuge des Projektes wurde die Software des Elektrolyseurs um eine Leistungssteuerung und einen Start/Stop-Betrieb erweitert. Mit Hilfe der Leistungssteuerung soll der wissenschaftliche Erkenntnisgewinn bei der Langzeitbetrachtung des Elektrolyseurs verbessert werden. Durch den Start/Stop-Betrieb sollen die Standby-Verbräuche des Elektrolyseurs deutlich reduziert werden und die Effizienzsteigerung dadurch demonstriert werden.

In den folgenden Kapiteln werden die Nachrüstungen und deren Umsetzung näher erläutert. In Kapitel 2.2 wird der Effekt der Nachrüstungen – soweit zum Berichtszeitpunkt möglich – untersucht und beschrieben.

### **2.1.1 Zweiter Hochdruckspeicher**

Es wurde ein zweiter Hochdruckspeicher in die Tankstelle integriert. Der neue Hochdruckspeicher dient als zweite Bank und bietet mehr Speichervolumen für Wasserstoff bei 900 bar. Durch die Integration des zweiten Hochdruckspeichers soll es möglich sein, Autos mit einem großen Fahrzeugtank (z.B. den Hyundai ix35), komplett zu befüllen. Außerdem wird angestrebt eine Betankung von zwei Fahrzeugen direkt hintereinander zu erreichen.

Der zweite Hochdruckspeicher wurde auf dem bereits vorhandenen Hochdruckspeicher platziert. Hierfür musste die Glasfront der Tankstelle (dient der optischen Aufwertung und um öffentliches Interesse zu wecken), sowie eine Brandschutzwand demontiert werden. Da der Speicher nur an den Enden aufgehängt werden darf, wurde der 4,5 Meter lange und ca. 2 Tonnen schwere Hochdruckspeicher von einer Spezialfirma mit Hilfe eines Staplers und eines langen H-Trägers auf dem vorhandenen Hochdruckspeicher platziert. Hierfür wurde der H-Träger auf den Zinken des Staplers befestigt und der Hochdruckspeicher mit Bändern an den H-Träger gehängt (siehe Abb. 03:). Somit musste das Dach der Tankstelle nicht demontiert werden, was einen enormen Aufwand bedeutet hätte.

Der neue Hochdruckspeicher besitzt eine UV-Beschichtung, weswegen er nicht, wie der vorhandenen Speicher, mit einer Blechumhausung versehen werden musste.

Eine aufgetretene Transportbeschädigung des Komposittspeichers (die Außenwand des Speichers wurde durch Befestigungsnägel leicht beschädigt) wurde vom Anlagenhersteller untersucht und mit Unterstützung durch den Speicher-Hersteller bewertet. Glücklicherweise war die Beschädigung unkritisch und konnte durch den Anlagenhersteller fachmännisch vor Ort behoben werden.

---

Kapazitätserweiterung HRS  
Freiburg,  
Arbeiten des Fraunhofer ISE

---



**Abb. 03: Einbringung des zweiten Hochdruckspeichers**

### 2.1.2 Zweiter Mitteldruck-Kompressor

Um die Erzeugungsleistung und die Verfügbarkeit der Tankstelle zu erhöhen wurde ein zweiter Mitteldruck-Kompressor beschafft und eingebaut. Dieser ist baugleich zum bereits vorhandenen Mitteldruck-Kompressor und wurde innerhalb des Kompressorraums über dem bereits vorhandenen Mitteldruck-Kompressor in der Tankstelle eingebaut. Da an dieser Stelle noch etwas Freiraum im Verfahrenstechnikbereich vorhanden war, konnte mit minimalem Aufwand und Verlegen weniger Leitungen der zweite Verdichter im Raum installiert werden. Durch den zweiten Mitteldruck-Kompressor ist es nun möglich diese parallel oder seriell zu betreiben. Beim seriellen Betrieb läuft ein Mitteldruck-Kompressor mit 30 Hüben/Minute für 5 Stunden. Nach den 5 Stunden läuft der zweite Mitteldruck-Kompressor mit 30 Hüben/Minute für weitere 5 Stunden. Beim parallelen Betrieb laufen beide Mitteldruck-Kompressoren mit 15 Hüben/Minute für 10 Stunden. Da ein Umschalten zwischen den beiden Betriebsarten nur händisch über Kugelhähne möglich ist, werden die Mitteldruck-Kompressoren üblicherweise im parallelen Betrieb betrieben.

Da die Betriebszeit pro Kompressor herstellerseitig nach Betriebserfahrungen auf 5 Stunden pro Tag bei 30 Hüben reduziert wurde, ist nun durch die Nachrüstung die tägliche Wasserstoff-Produktion effektiv verdoppelt worden.

Aufgrund von Verschleiß muss der Mitteldruck-Kompressor zwei Mal im Jahr zur Wartung eingeschickt werden. Durch das Einstellen von asymmetrischen Hubzahlen der Kompressoren zueinander ist somit gewährleistet, dass immer ein Kompressor vor Ort ist und Wasserstoff komprimieren kann. Da dies in der Vergangenheit öfters zu Ausfällen gesorgt hat, war diese Nachrüstung sehr erforderlich.

Da sich der neue Mitteldruck-Kompressor über dem bereits vorhandenen Mitteldruck-Kompressor befindet und der Schallschutz nur im unteren Bereich des Aufbaues angebracht war, musste der Schallschutz für den oberen Mitteldruck-Kompressor erweitert werden. Außerdem wurde an der Decke über den beiden Mitteldruck-Kompressoren eine Schallschutzmatte angebracht, um die Schall-Emission auf dem bisherigen Niveau zu halten.

---

Kapazitätserweiterung HRS  
Freiburg,  
Arbeiten des Fraunhofer ISE

---



**Abb. 04: Kompressorraum mit zweitem Mitteldruck-Kompressor (oben)**

### 2.1.3 Lüftungsumbau

Im Betriebsmittelraum der Tankstelle herrschen bei hohen Außentemperaturen hohe Innentemperaturen, was zur Beschädigung oder beschleunigten Alterung der Elektronik in diesem Raum führen kann. Außerdem befindet sich im Betriebsmittelraum die Kälteanlage, welche den Wasserstoff bei der Betankung auf  $-40^{\circ}\text{C}$  herunterkühlt. Eine hohe Temperaturspreizung zwischen der Raumtemperatur und dem Kältemitteltank bedeutet somit auch hohe Energieverluste.

Um die Temperatur im Betriebsmittelraum und die Alterung der Komponenten zu senken wurde ein größerer Ventilator installiert. Dieser erzeugt einen größeren Volumenstrom, wodurch sich der Luftwechsel im Betriebsmittelraum erhöht. Zudem wurde der Ansaugpunkt des Ventilators Richtung Kälteanlage verschoben, wodurch eine Luftzirkulation durch den ganzen Container ermöglicht wird, da die Absaugung nun diagonal versetzt zur Luftzufuhr ist.

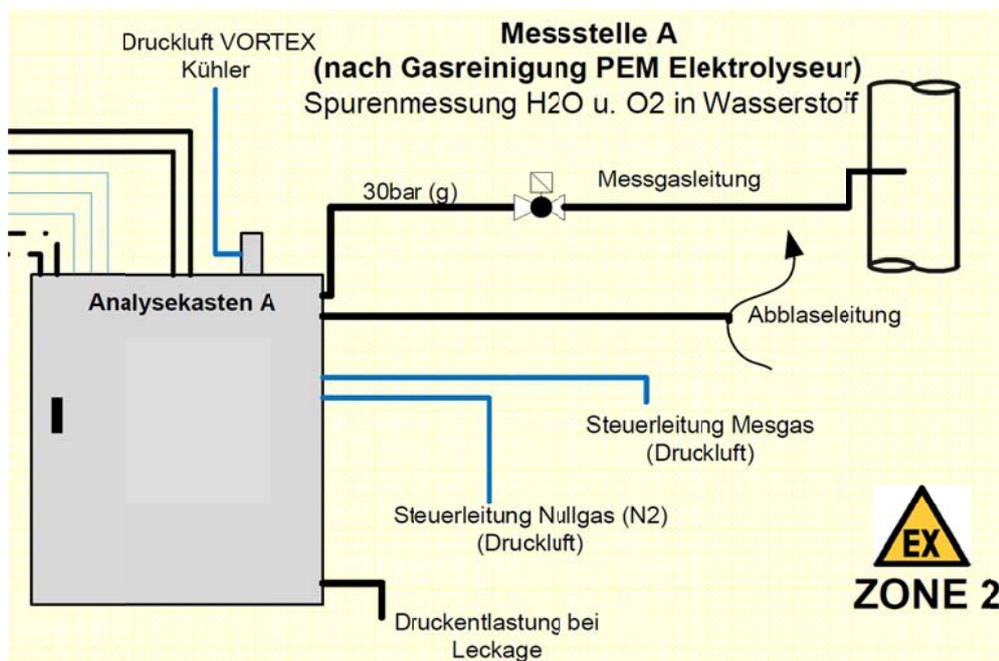
Kapazitätserweiterung HRS  
Freiburg,  
Arbeiten des Fraunhofer ISE



**Abb. 05: Betriebsmittelraum mit neuer Luftführung**

### 2.1.4 Gas-Analytik

Um den Wasser- und Sauerstoffgehalt des Wasserstoffes nach dem Elektrolyseur und bei der Betankung eines Autos zu messen, wurden zwei Analyseboxen in die Tankstelle integriert. Diese wurden vom Projektpartner Sick ausgelegt, bestückt und zur Verfügung gestellt (vgl. Kapitel 4). Die Analyseboxen befinden sich im explosionsgeschützten Bereich direkt neben den Hochdruckspeichern (EX-Zone 2) und sind dementsprechend ausgeführt. Der gemeinsame Auswerteschrank beider Boxen befindet sich außerhalb der Tankstelle, da eine Einrichtung in der explosionsgeschützten Zone den Aufwand ohne zusätzlichen Nutzen vergrößert hätte.



**Abb. 06: Schematische Darstellung Qualitätsmessung – Detailauszug von 0**

Eine der zwei Analyseboxen misst den Wasser- und Sauerstoffgehalt des Wasserstoffes direkt nach dem Elektrolyseur. Somit kann genau aufgezeichnet werden, welche

Qualität der Wasserstoff hat, der erzeugt wird. Die Analysebox wird durchströmt, wenn die Mitteldruckkompressoren betrieben werden.

Die zweite Analysebox misst den Wasser- und Sauerstoffgehalt des Wasserstoffes, welcher in die Hochdruckspeicher gepumpt wird und bei der Betankung anschließend ins Auto fließt. Somit können Verunreinigungen auf dem Weg von der Erzeugung bis hin zur Betankung des Wasserstoffes analysiert werden.

Laut Spezifikation der Sick AG ist die sichere Vermeidung einer explosionsartigen Atmosphäre an den Sensoren notwendig. Aus diesem Grunde wurde eine Stickstoff-Spülung der Boxen vor und nach der Beaufschlagung mit dem Messgas integriert und die Stickstoffversorgung in die Sicherheitskette integriert.

Die Boxen ermöglichen unterschiedliche Durchflüsse (zur Erreichung unterschiedlicher Reaktionszeiten bei unterschiedlichen Verlustströmen) und die Spüldauer wurde in der Tankstellensteuerung anpassbar gestaltet. So soll im über das Projekt hinausgehenden Feldtest eine Optimierung und eine Erprobung bei verschiedenen Einstellungen ermöglicht werden.

Sollte sich die Notwendigkeit einer Stickstoff-Spülung eliminieren lassen, würde dies deutlich Kostenersparnisse sowohl seitens der Analyse-Kästen, als auch seitens der Tankstellenintegration ermöglichen.

### 2.1.5

#### **Massedurchflussmesser H2-Tankstelle**

Im Betrieb sind bei Überwachung der H2-Tankstelle hohe Energieverbräuche im Vergleich zur abgegebenen Wasserstoff-Menge aufgefallen. Eine grobe Voruntersuchung hat den Verdacht erweckt, dass deutliche Wasserstoff-Mengen aus der Anlage verschwunden sind. Diese Mengen überschritten spürbar die Ungenauigkeiten der involvierten Messgeräte, konnten jedoch nicht genauer zugeordnet werden.

Um diese Wasserstoffverluste analysieren und beseitigen zu können (und damit die Effizienz und Abgabekapazität der Anlage zu erhöhen) wurde die Anlage um zwei Wasserstoff-Durchflussmesser erweitert:

Einen Massedurchflussmesser direkt nach dem Elektrolyseur und ein zweiter, baugleicher Massedurchflussmesser in der Abgabelitung an die Hausversorgung. Die Hausversorgung unterstützt bei Stillstand der Kompressoren die Wasserstoff-Versorgung von institutsinternen Testständen mit Elektrolyse-Wasserstoff von der Tankstelle.

Mit Hilfe der beiden Massedurchflussmesser ist es nun möglich eine Massebilanz der Tankstelle zu erstellen, da die Erzeugung, die Abgabe an die Hausleitung und die Menge der Betankung (über den bereits 2013 installierten Mengemesser im Betankungsstrang) bekannt sind, womit alle gewollten Ein- und Ausgangsströme überwacht werden können

Mit dem Massedurchflussmesser können damit Verlustströme, Undichtigkeiten oder Leckagen in der Anlage zeitaufgelöst bestimmt und identifiziert werden.

### 2.1.6

#### **Integration Elektrolyse-Leistungssteuerung**

Bisher ist für den Elektrolyseur nur eine druckgeführte Fahrweise möglich gewesen, d.h. bei Gegendruckabfall produziert der Elektrolyseur bei Vollast Wasserstoff. Ein Teillastbetrieb ist technisch möglich, jedoch in der Elektrolyse-Steuerung nicht möglich, womit eine wissenschaftliche Analyse des Elektrolyse-Betriebs bspw. in Form einer Betrachtung der Langzeitalterung oder einer Charakterisierung nicht möglich ist.

Zudem ist der Elektrolyseur bisher auf einen Dauerbetrieb konzipiert. Wenn kein Wasserstoffbetrieb vorliegt, geht der Elektrolyseur in einen Standby – von dem aus jederzeit in Sekundenbruchteilen wieder bei Volllast produziert werden kann. Dieser Standby benötigt jedoch eine sehr hohe elektrische Leistung.

---

Kapazitätserweiterung HRS  
Freiburg,  
Arbeiten des Fraunhofer ISE

---

Um den Wissensgewinn durch die Charakterisierung zu ermöglichen, wurde ein Upgrade auf die neueste Steuerungsversion durchgeführt. Diese ermöglicht eine Leistungssteuerung über Mod-Bus gekoppelt mit einer externen Start-Stop-Vorgabe.

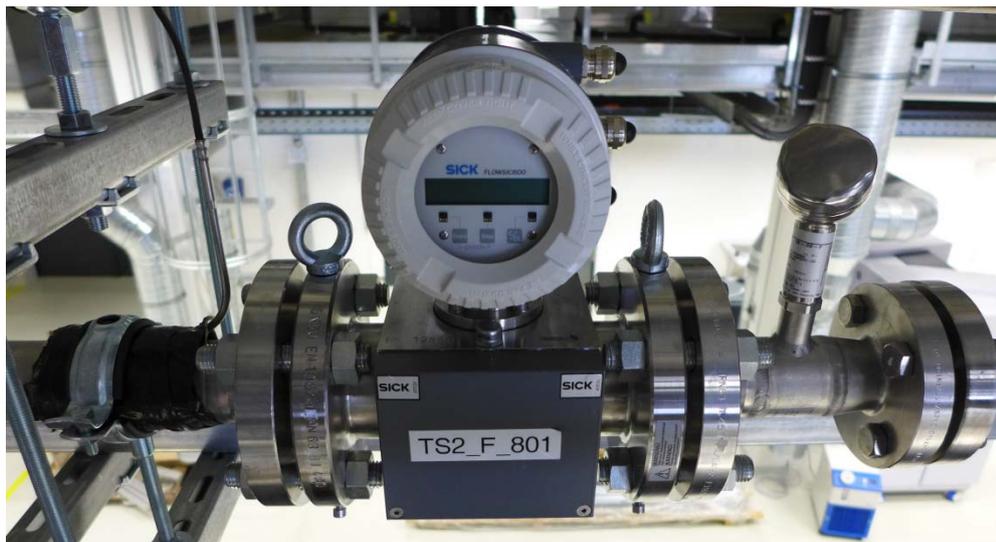
Der Elektrolyseur kann nun entweder direkt über eine Modbus-Schnittstelle angesprochen werden (bspw. für einen leistungsgeführten Betrieb) oder durch die Integration in die Tankstellensteuerung kann auch ein Sollwert in der Steuerung die maximale Sollleistung des Elektrolyseurs vorgegeben werden. Mit Hilfe dieser Leistungssteuerung können verschiedene Lastprofile dem Elektrolyseur vorgegeben werden.

Bei der Integration der Leitungsvorgabe in die bereits existierende Steuerung traten diverse Probleme bei der Kommunikation mit dem Elektrolyseur auf, die jedoch schlussendlich gelöst werden konnte.

Durch die Nachrüstung erhält der Elektrolyseur die Möglichkeit in einen leistungsreduzierten kalten Standby zu verfallen. Diese Funktion wurde in die Tankstellen-Steuerung integriert, so dass nun die Tankstelle den Elektrolyseur bei Stillstand deaktivieren kann. Dies wird genutzt, um bei Stillstand der Kompressoren und fehlender Abnahme durch die Hausleitung den Elektrolyseur abzufahren und Strom zu sparen. Dieses Remote-Start und Remote-Stop-Signal kann automatisch über einen Drucksensor mit Druckschwellen, als auch manuell über den Bediener gesetzt werden. Dies ermöglicht nun auch den Einfluss von Start-Stop-Zyklen auf die Lebensdauer zu analysieren.

### 2.1.7 Ultraschall-Mengenmesser

Die Mengenmessung der Sick AG kann aufgrund der an der Tankstelle zu geringen Arbeitsvolumenströme ( $6 \text{ Nm}^3/\text{h}$  @ 30 bar statt  $60 \text{ Nm}^3/\text{h}$  @ 5 bar) nicht in die Tankstelle integriert werden.



**Abb. 07: Ultraschallmengen-**  
**messer im eingebauten**  
**Zustand**

Daher wurde die Mengenummessung in einen 200kW-Elektrolyse-Teststand integriert und wird nun nach Inbetriebnahme des Teststandes den ausgehenden Volumenstrom messen. Der 200kW-Teststand bietet hierbei die spezifizierten Volumenströme mit, jedoch bei schwankender Gasqualität. Das Fraunhofer ISE beabsichtigt, die Messdaten der Mengenummessung der SICK auch mindestens 1 Jahr nach Projektende zur Verfügung zu stellen, so dass auch weiterhin ein Feldtest nahe der ursprünglichen Anwendung möglich ist.

## 2.2 Bewertung der Änderungen

### 2.2.1 Zweiter Hochdruckspeicher

Durch die Integration eines zweiten Hochdruckspeichers ist es nun möglich Autos mit einem großen Tank, wie z.B. den Hyundai ix35 oder den Toyota Mirai, voll zu betanken. Dies war früher, aufgrund des Druckausgleiches zwischen Hochdruckspeicher und Auto nicht möglich.

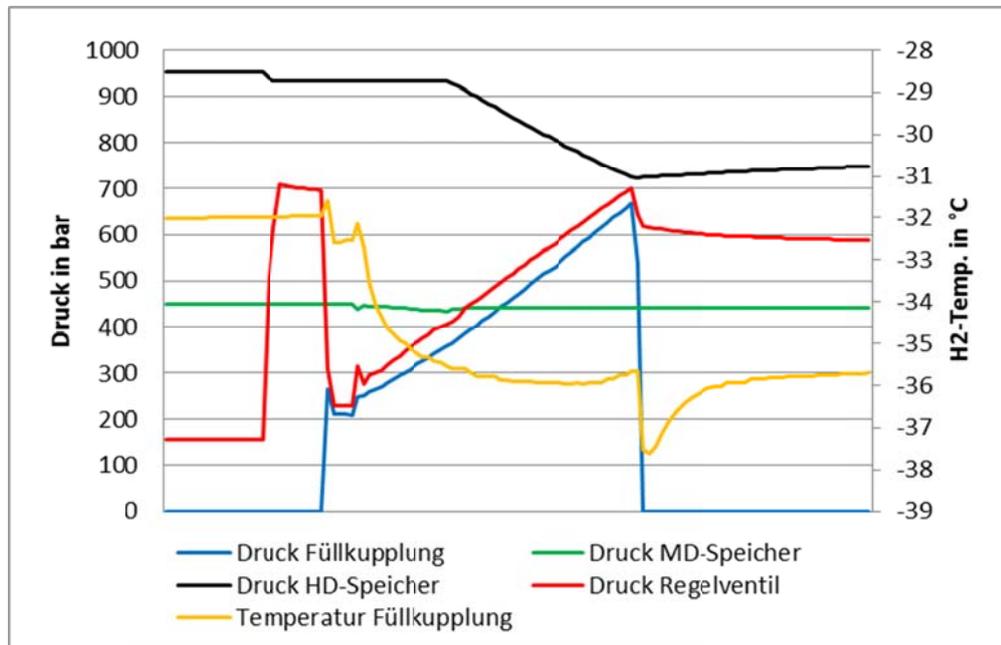
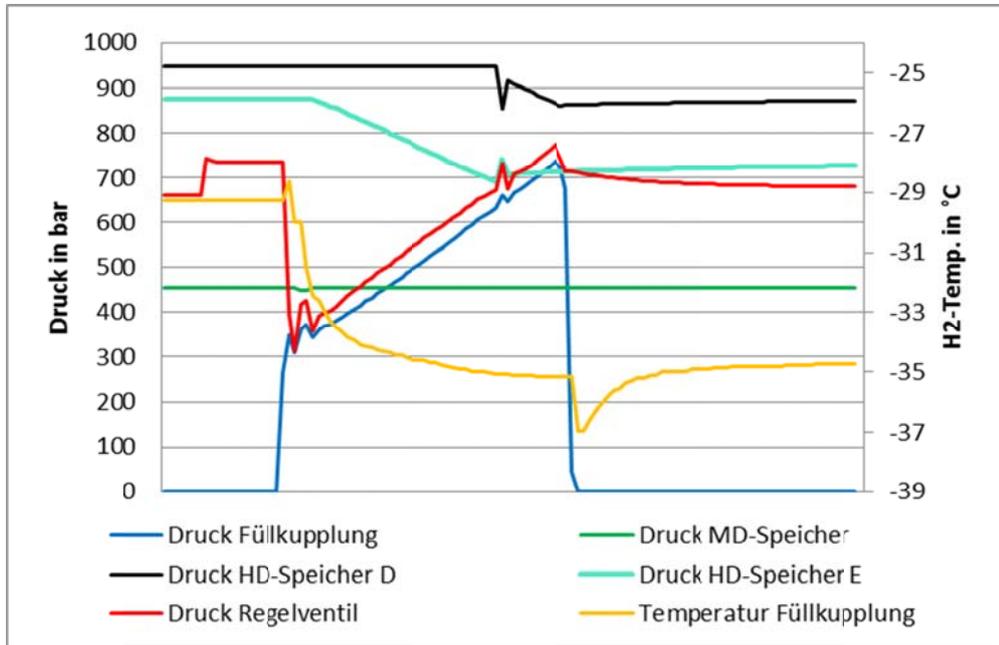


Abb. 08: Betankung Hyundai ix35 mit einem Hochdruckspeicher

In Abb. 08: ist eine exemplarische Betankung eines Hyundai ix35 zu sehen. Man kann erkennen, dass der Druck in der Füllkupplung (blau), welche annähernd dem Tankdruck entspricht, am Ende der Betankung bei 670 bar liegt. Somit wurde das Fahrzeug nicht komplett voll betankt, da es zu einem verfrühten Druckausgleich mit dem Hochdruckspeicher (schwarz) kam.

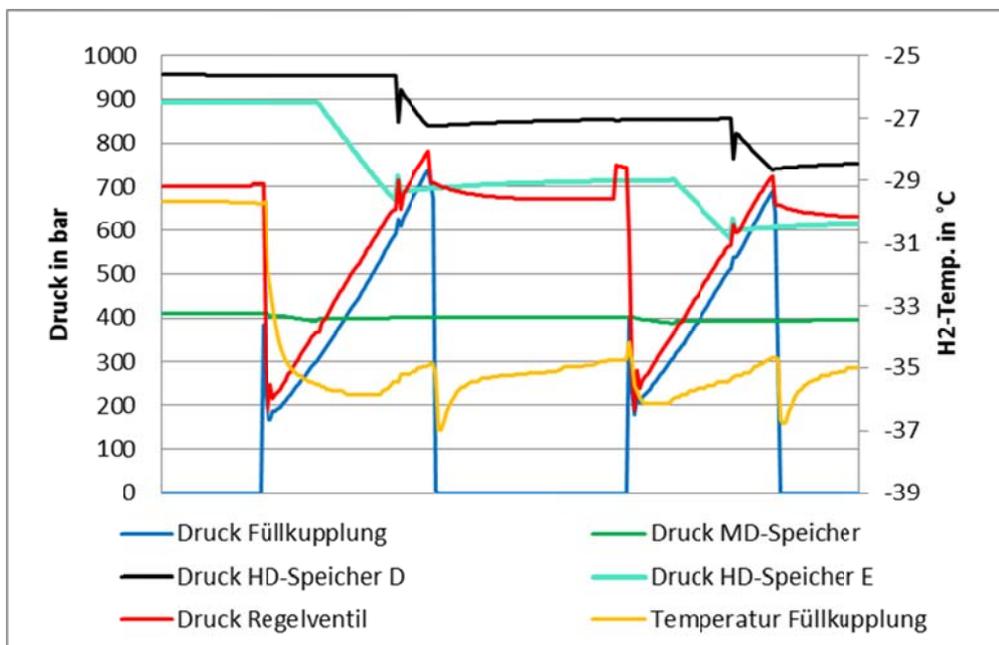
In Abb. 09: ist eine Betankung mit zwei Hochdruckspeichern nach der Nachrüstung dargestellt. Es handelt sich hierbei um dasselbe Fahrzeug wie in Abb. 08: Bei der Betankung mit zwei Hochdruckspeichern ist deutlich zu erkennen, dass der Enddruck des Fahrzeuges bei deutlich über 700 bar (735 bar) liegt. Eine Vollbetankung eines Fahrzeuges mit größerem Tank ist damit möglich.

Kapazitätserweiterung HRS  
Freiburg,  
Arbeiten des Fraunhofer ISE



**Abb. 09: Betankung Hyundai ix35 mit zwei Hochdruckspeichern**

Zusätzlich bestand auch die Hoffnung zwei Fahrzeuge direkt hintereinander (back-to-back) betanken zu können.



**Abb. 10: Back-to-back Betankung**

In Abb. 10: ist die Betankung zweier Wasserstofffahrzeuge (erste Betankung Hyundai ix35; zweite Betankung Toyota Mirai) direkt hintereinander dargestellt. Der zeitliche Abstand zwischen dem Start der ersten Betankung und dem Ende der zweiten beträgt 6:40 Minuten. Zwischen den beiden Betankungen wurden die Kompressoren deaktiviert, sodass die Speicher nicht wieder befüllt wurden.

Als erstes wurde der Hyundai ix35 betankt. Startdruck des Fahrzeuges waren 170 bar. Der Enddruck beträgt 740 bar, was einer durch den Coriolis-Messer der Tankstelle gemessenen Tankmenge von 3,77 kg entspricht. Der Druck in den Hochdruckspeichern fiel durch die Betankung von 955 bar auf 850 bar im Hochdruckspeicher D bzw. von 895 bar auf 700 bar im Hochdruckspeicher E.

Als zweites Auto wurde der Toyota Mirai betankt. Startdruck des Fahrzeuges waren 180 bar. Der Enddruck beträgt 690 bar, was einer durch den Coriolis-Messer der Tankstelle gemessenen Tankmenge von 2,95 kg und gemäß Fahrzeug-Daten der IR-Schnittstelle einem Füllgrad / SOC von ca. 92% entspricht. Der Druck in den Hochdruckspeichern fiel durch die Betankung von 850 bar auf 740 bar im Hochdruckspeicher D bzw. von 700 bar auf 610 bar im Hochdruckspeicher E. Auch der Temperaturverlauf der Vorkühlung ist ohne Anpassung absolut im Rahmen der Norm und stellt trotz Hochsommer kein Problem dar.

Durch die Integration des zweiten Hochdruckspeichers ist es somit möglich zwei Autos mit größerem Tankvolumen wie die aktuell verfügbaren Fahrzeuge von Hyundai und Toyota hintereinander zu betanken und beide Fahrzeuge annähernd komplett zu befüllen. Auch wenn eine vollständige back-to-back-Betankung damit nicht möglich ist, ist das dahinter stehende Ziel – nämlich die Vermeidung einer potenziellen Wartezeit an der Freiburger HRS – erfüllt. Dies gilt natürlich nur solange die Fahrzeugzahlen in Freiburg nicht sprunghaft steigen (wobei hier die Freiburger HRS aber an andere Grenzen stoßen würde) oder bspw. aufgrund eines Wasserstoff-bezogenen Workshops kurzfristig sehr viele Wasserstoff-Fahrzeuge gefüllt werden müssen.

### **2.2.2 Zweiter Mitteldruck-Kompressor**

Durch die Installation des zweiten Mitteldruckkompressors konnte die tägliche Produktionsrate verdoppelt werden. Somit ist die Tankstelle auch für den Fahrzeugzuwachs gerüstet. Zudem kann bei einem Ausfall eines Kompressors (bspw. durch Wartung oder Reparatur) der zweite Verdichter weiter arbeiten, so dass nur noch die halbe Wasserstoff-Erzeugungskapazität zur Verfügung steht. Die Verfügbarkeit der Tankstelle sollte damit aber gewährleistet sein – eine Bewertung kann nur langfristig erfolgen.

Im Folgenden wird noch der Einfluss auf die restliche Peripherie untersucht, um zu sehen, ob durch den gleichzeitigen Betrieb beider Verdichter gleichzeitig größere Druck- oder Temperaturschwankungen entstehen. In der Konzeption bestand bei Anlagenhersteller und Fraunhofer ISE Konsens, dass dies mit großer Sicherheit kein Problem ergibt – für die Abnahme wurde das dennoch überprüft.

In Abb. 11: ist der Druck- und Temperaturverlauf vor und nach den Mitteldruck-Kompressoren aufgezeichnet. Hierbei wurde festgestellt, dass die Integration des zweiten Mitteldruck-Kompressors und der parallele Betrieb der beiden Kompressoren keinen kritischen Einfluss auf den Eingangsdruck (PT-101), sowie die Ausgangstemperatur (TZH-101) haben. Der Eingangsdruck sinkt kurzfristig auf 25 bar, da der Elektrolyseur aus dem Standby startet und eine kurze Zeit braucht, bis er Wasserstoff zur Verfügung stellt. Anschließend produziert der Elektrolyseur mehr Wasserstoff, als von den Kompressoren in der dort gewählten Einstellung (konservativer Betrieb) benötigt wird, sodass der Eingangsdruck auf 29 bar steigt und sich dort stabilisiert, da der Elektrolyseur die Produktion entsprechend reduziert (druckgeführter Betrieb).

Die Ausgangstemperatur beider Verdichter nach Nachkühlung steigt mit zunehmender Betriebsdauer der beiden Kompressoren auf 29 °C an. Eine Abschaltung wegen einer zu hohen Ausgangstemperatur erfolgt bei 60 °C, von der wir im fehlerfreien Betrieb weit entfernt sind.

Der Druck am Ausgang der Mitteldruck-Kompressoren (PT-103) schwankt nur im Bereich von 1 – 2 bar und ist somit unkritisch. Weitere Maßnahmen bezüglich Pufferspeicher, Filter oder Nach-Kühlung sind damit nicht notwendig und die Koppelung beider Verdichter arbeitet wie erwartet ohne Probleme.

Kapazitätserweiterung HRS  
Freiburg,  
Arbeiten des Fraunhofer ISE

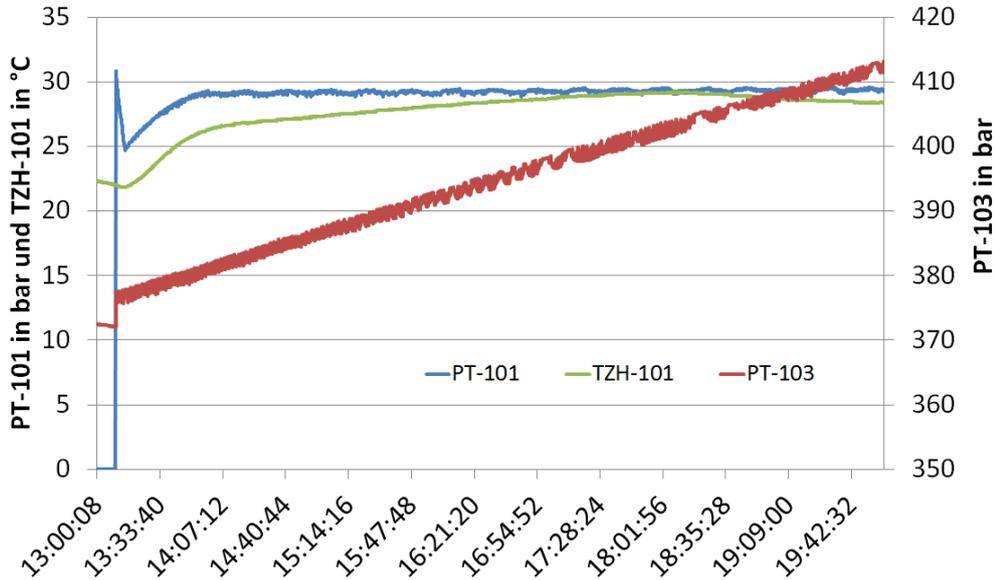


Abb. 11: Druck- und Temperaturverlauf vor und nach den Mitteldruck-Kompressoren

### 2.2.3 Lüftungsumbau

Durch den Lüftungsumbau soll die Temperatur im Betriebsmittelraum gesenkt werden. Aufgrund des sensiblen Themas Lärmschutz konnte nicht völlig lösungsoffen agiert werden, sondern es wurde beschlossen, nur die Ventilatorleistung zu erhöhen und einen geänderten Absaugungsort umzusetzen.

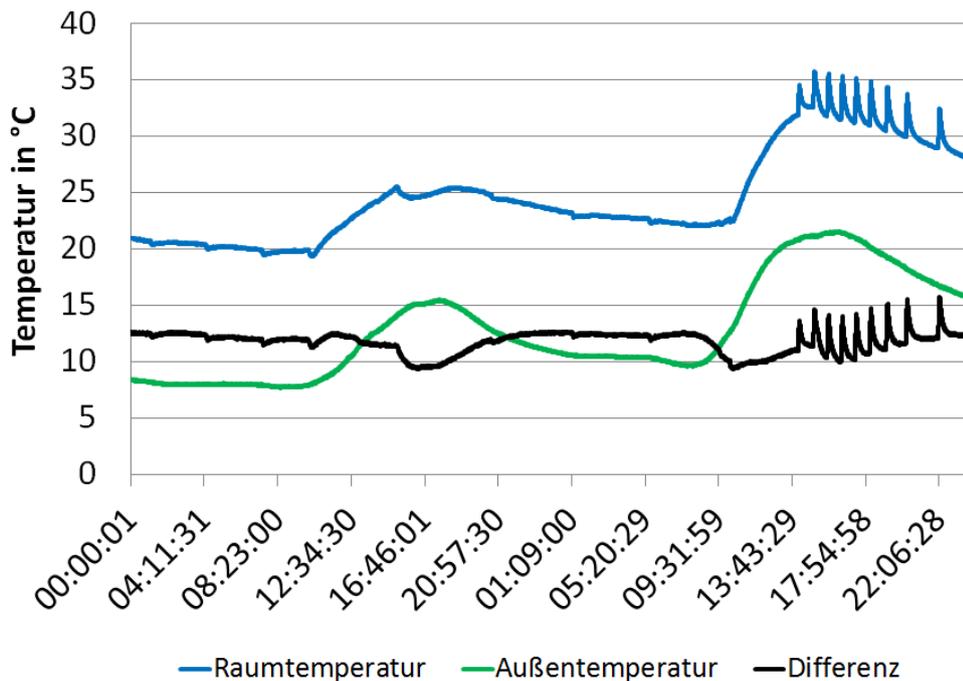


Abb. 12: Temperaturverlauf vor Umbau

In Abb. 11: und Abb. 12: sind die Temperaturverläufe im Betriebsmittelraum, die Außentemperatur, sowie die Differenz aus beiden dargestellt. Vor dem Umbau der Lüftung im Betriebsmittelraum (Abb. 12:) erhöhte sich die Temperatur im Betriebsmittelraum zeitgleich mit der Außentemperatur. Der Sägezahnverlauf ab 32 °C wird verursacht durch einen Schaltschrank welcher seine Abwärme ca. 50 cm neben dem Temperatursensor des Betriebsmittelraums abgibt.

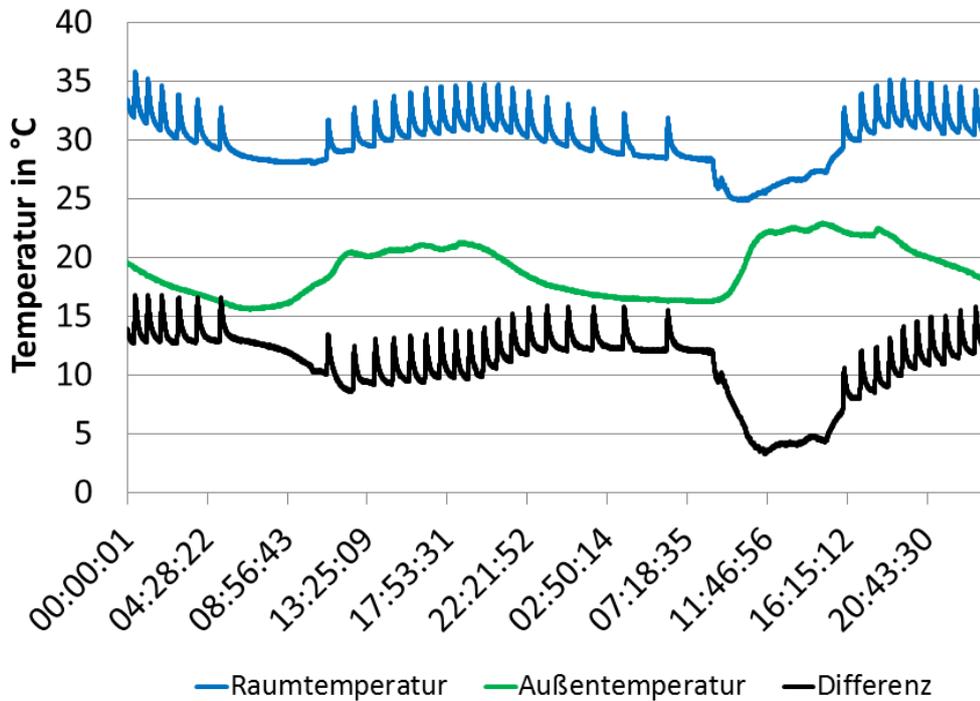


Abb. 13: Temperaturverlauf nach Umbau

Nach dem Umbau der Lüftung im Betriebsmittelraum (Abb. 13:) lässt sich nahezu derselbe Verlauf beobachten.

Die Differenz zwischen Außentemperatur und Temperatur im Betriebsmittelraum konnte damit leider nicht wie gewollt verbessert werden. Aktuell wird überlegt, den Ausblaseort anzupassen, um die Nachrüstung zum Erfolg zu führen. Dies kann jedoch zeitlich nicht mehr im Rahmen des Projektes geschehen.

#### 2.2.4 Gas-Analytik

Mit Hilfe der vom Partner Sick erstellten Gas-Analytik soll die Gasqualität des Wasserstoffes auf Sauerstoff- und Wassergehalt analysiert werden.

Die Boxen wurden über ein zuschaltbares Ventil vor den Mitteldruckkompressor und am Hochdruckspeicher angeschlossen. Um den Wasserstoff-Verbrauch in Stillstandszeiten gering zu halten, werden die Boxen nur während dem Betrieb der Verdichter oder während einer Betankung mit Wasserstoff durchströmt.

Da der O<sub>2</sub>-Sensor in den Analyseboxen nur für eine maximale Temperatur von 40 °C ausgelegt ist, müssen die Analyseboxen gekühlt werden. Dies erfolgt mittels VORTEX-Kühler. Dieser nutzt Druckluft als Energiequelle und kühlt dadurch den Innenraum. Da sich die Analyseboxen im Außenbereich der Tankstelle befinden gibt es aktuell noch Probleme mit der Lärmemission der Kühler, da diese durch die Verwendung von Druckluft, welche an die Umgebung abgegeben wird, sehr laut sind. Zudem sorgt das zischende Geräusch aufgrund seiner Ähnlichkeit zu einer Leckage zu Angst bei Tankgästen und Mitarbeitern. Projektnachgelagert muss daher noch eine Lösung für Kühlung oder Schalldämmung gefunden werden.

In Abb. 14: ist der Verlauf einer Qualitätsmessung der Analysebox ANA dargestellt. Aufgrund der Stickstoffspülung, welche vor und nach jeder Messung erfolgen muss, wird während den ersten 20 Sekunden jeder Messung (Spülzeit ist einstellbar gestaltet) die Gasreinheit des Stickstoffs gemessen. Erst nachdem das System 20 Sekunden mit Stickstoff gespült wurde, erfolgt die Zuschaltung des Wasserstoffes.

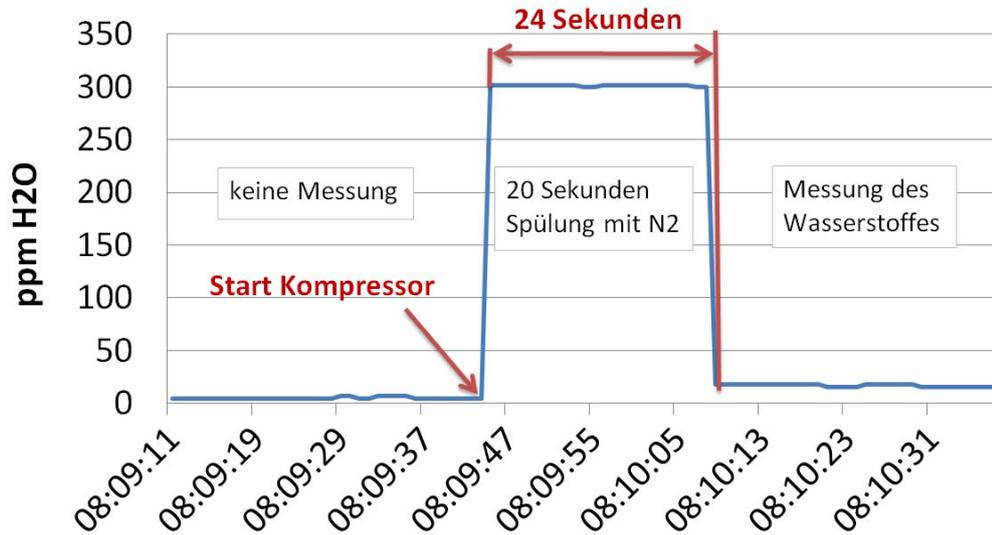


Abb. 14: Qualitätsmessung  
Wasserdampf nach  
Elektrolyseur

24 Sekunden nach Starten des Kompressors pendelt sich die Feuchtigkeitsmessung auf einen Zielwert von ca. 15 ppm ein. Das bedeutet, dass bereits 4 Sekunden nach Umschalten die Feuchtigkeit des Wasserstoffes gemessen wird, was der spezifizierten Reaktionszeit entspricht und eine Nutzung des Sensors zur Abschaltung der Anlage bei Versagen der Gasreinigung zu verwenden.

Jedoch findet über die folgenden Stunden eine weitere Abnahme des Wasserstoffwerts bis hin zu einem Wert von 6 ppm statt. Es wird vermutet, dass dies darin begründet wird, dass der relativ feuchte Stickstoff zu einer Wasserablagerung / Adsorption an den Rohrleitungen führt, welcher erst wieder herausgespült werden muss. Auch zu Beginn der Installation konnte beobachtet werden, dass über mehrere Wochen hinweg die Feuchtemessung sich von den anfangs sehr hohen Werten auf einen Zielwert eingeschwungen hat.

Die Werte für die Sauerstoffmessung bewegen sich am selben Messpunkt nach dem Einschwingen im Bereich von 2 ppm.

Im Zuge eines anderen Projektes wurden Messungen der Wasserstoffqualität bei der Betankung durchgeführt. Dazu wurde ein Blindstrom an Wasserstoff bei der Betankung in einen Gasflasche geleitet und anschließend im Labor analysiert. Hierbei sind Werte von 2 ppm +/- 1 ppm Wasser und 0,27 ppm +/- 0,07 ppm für Sauerstoff gemessen worden. Diese Werte sind vergleichbar zu vorhergehenden Gasanalysen anderer Labore. Die Messung der installierten Qualitätsmessung weicht noch von diesen Werten ab, was an der Auflösung der Sensoren, der zu diesem Zeitpunkt noch nicht funktionsfähigen Druckkompensation und Temperierung der Sensoren, als auch an der Messkette (Übertragung an die H<sub>2</sub>-Tankstelle über ein 4 – 20 mA Signal) liegen kann.

Seitens der Sick AG ist noch geplant, nach Abschluss der Korrekturarbeiten (Druckkompensation und Temperierung der Sensoren), Vergleichsmessungen mit Prüfgas durchzuführen, um weitere Erkenntnisse zu gewinnen.

## 2.2.5

### Massedurchflussmesser

Die Massedurchflussmesser dienen zur Bestimmung der Wasserstoffverluste innerhalb der Tankstelle durch Wartung, Undichtigkeiten oder Umbauten.

Zur Bewertung der Methodik wurde im August 2016 exemplarisch eine Bilanzierung der Tankstelle durchgeführt. Hierfür wurde ein Zeitraum von 20 Tagen betrachtet, in dem aufgrund der Ferien in Baden-Württemberg unglücklicherweise wenige Betankungen stattgefunden haben.

Es wurde zum Beginn des betrachteten Zeitraums der Wasserstoffinhalt in den einzelnen Speichern über den Speicherdruck und die Außentemperatur bestimmt. Dies ist notwendig um den Zuwachs bzw. den Verlust an gespeichertem Wasserstoff mit in die Bilanzierung einfließen zu lassen. Für den betrachteten Zeitraum wurde die Menge des produzierten Wasserstoffes vom Elektrolyseur über die im Projekt installierten Massedurchflussmesser bestimmt. Ebenso wurde die Menge an Wasserstoff ermittelt, die für den hausinternen Gebrauch bereitgestellt wurde.

Die Menge des vom Elektrolyseur produzierten Wasserstoffes betrug 33,33 kg. 13,48 kg wurden an die Ausleitung abgegeben. 14,24 kg Wasserstoff wurden in diesem Zeitraum betankt. Der Füllstand der Speicher hat sich um 0,48 kg verändert. Das bedeutet, dass 5,14 kg Wasserstoff verloren gegangen sind. Die entspricht 26%. Berücksichtigt man bei der Bilanzierung die Messungenauigkeiten der einzelnen Komponenten wie Drucksensor ( $\pm 0,5\%$  v.E.), Temperatursensor ( $\pm 0,5$  °C), Coriolismesser (-5% +15% v.M. gemäß Kapitel 2.3) und Massedurchflussmesser ( $\pm 0,5\%$  v.M. plus  $\pm 0,1\%$  v.E.), sowie die thermische Trägheit der Speicher (Annahme für Fehler: Temperatur Speicher kann auch die Außentemperatur 3 Stunden vor der Messung sein) kommt man zu einem prozentualen Verlust von  $26\%_{-22\%}^{+16\%}$  Wasserstoff. Der Messfehler ist sehr groß, da nur ein kurzer Zeitraum betrachtet wurde und die Ungenauigkeit der Speicherfüllstandbestimmung (vor allem der thermischen Trägheit) daher überproportional schwer ins Gewicht fällt. Ein wesentlicher Fehler geht auch vom Coriolismesser aus. Dieser hat bedingt durch den Einbauort eine Genauigkeit von -5% +15% v.M. – dies wird bei einer langfristigeren Messung den Messfehler dominieren. Es wurde außerdem darauf geachtet, dass im Messzeitraum keine Fehlerevents, Umbauarbeiten oder (für den Wasserstoffverlust relevante) Wartungen durchgeführt wurden.

Fazit ist, dass vermutlich ein nennenswerter Wasserstoff-Verlust vorhanden ist, die Bilanzierung jedoch eine recht hohe Ungenauigkeit hat. Daher plant das Fraunhofer ISE in einem Projektantrag die Wasserstoff-Verluste über einen längeren Zeitraum und zeitlich aufgelöst zu identifizieren, um Rückschluss auf ggf. auch für andere Tankstellen gültige Verlustursachen zu gewinnen. Hierfür soll auch die Methodik noch überarbeitet werden, um die oben genannten Messfehler ggf. teilweise rechnerisch zu kompensieren.

## 2.2.6

### Integration Elektrolyse-Leistungssteuerung

Mit Hilfe der Leistungssteuerung des Elektrolyseurs ist es nun möglich verschiedene Regelmethode zu demonstrieren, den Elektrolyseur stromgeführt zu betreiben (bspw. bei größerer Leistung an Strommärkten) und den Elektrolyseur auch wissenschaftlich zu untersuchen. **Tatsächlich handelt es sich bei der Nachrüstung um eine Elektrolyse-Stromsteuerung und nicht Leistungssteuerung, da nur die Stromstärke des Zellstapels angepasst wird.** Da sich durch die Umrüstung auch die Schnittstelle für das Messwert-Erfassungs-Tool verändert hat, die Erfassung daher

aktuell nicht funktionsfähig ist und die Lösung gerade in Klärung ist, konnte für den Bericht keine beispielhafte Auswertung aus der Abnahme verwendet werden. Die bei der Messung beobachteten Werte zeigen jedoch, dass ein Betrieb mit stromgeführter Steuerung es ermöglicht, eine Leistungsobergrenze festzulegen, die vom Elektrolyseur dann eingehalten wird solange der Gegendruck nicht über eine gewisse Schwelle steigt. D.h., bei ausreichender Abnahme auf der Gegenseite wird die Maximalleistung vglw. genau eingehalten. Das Minimum beim verwendeten Elektrolyseur ist eine Stromstärke von 30% der Nennstromstärke, die außerhalb von Start- oder Stoppvorgängen vom **Zellstapel** eingehalten wird. Die Peripherie agiert davon unabhängig – eine Aussage zum Einfluss der Peripherie kann aktuell wegen o.g. Probleme bei der Datenerfassung nicht getroffen werden. Die Leistung ergibt sich aus dem Produkt von Stromstärke und Spannung – die Spannung verändert sich jedoch wie bei allen Elektrolyseuren bei Veränderung der Last und Systemtemperatur. Die Temperaturveränderungen sind aufgrund der geringen thermischen Kapazität des eingesetzten Elektrolyseurs vermutlich fast vernachlässigbar, die Lastabhängigkeit kann mit Hilfe der Nachrüstung ermittelt werden.

Für einen sauberen leistungsgeführten Betrieb bspw. am Strommarkt ist ein weiterer Software-Regler notwendig, welcher die Stromstärke des Elektrolyseurs abhängig von der Leistung anpasst – dies ist in der Regel aber kein Problem, wurde hier jedoch nicht umgesetzt.

Die Elektrolyse-Leistungssteuerung wird als Nachrüstung gekoppelt mit einer Schnittstelle für die Start-Stop-Steuerung ausgeliefert. Durch die Integration der Möglichkeit den Elektrolyseur herunterzufahren, wenn kein Wasserstoff für die Tankstelle oder den hausinternen Verbrauch benötigt wird, kann der Energieverbrauch des Elektrolyseurs bei langen Standby-Phasen verringert werden. Zur Analyse des Effekts wurden zwei Messungen des Energieverbrauches in Relation zum produzierten Wasserstoff gemacht. In beiden Fällen wurde der Energieverbrauch des Elektrolyseurs über 20 Stunden ermittelt. Während acht dieser 20 Stunden wurde Wasserstoff produziert, die restlichen 12 Stunden war der Elektrolyseur im warmen Standby (ohne Abschaltung) oder im kalten Standby (mit Abschaltung / Nachrüstung). Durch die geringe Auslastung und da die Kompressoren aus Lärmschutzgründen nachts nicht in Betrieb sind, entspricht der oben genannte Betrieb mit 12 Stunden Standby über Nacht dem normalen Betrieb der Anlage, ist aber bei geringer Auslastung auch auf andere Tankstellen mit on-Site-Erzeugung übertragbar (Wichtig: andere Elektrolyseure haben abweichende Konfiguration und Stand-By-Bedarfswerte!). Das Ergebnis der Messung ist in Abb. 15: dargestellt. Zu ergänzen ist in dem Kontext, dass es sich beim Elektrolyseur des Fraunhofer ISE um ein Modell älterer Bauart, kleiner Leistung und nicht auf wirkungsoptimierter Entwicklung handelt. Aktuell in Demoprojekten erprobte PEM-Elektrolyseure erreichen durchaus demonstrierte Systemwirkungsgrade inklusive Kühlung und sonstiger Peripherie je nach Größe und Bauart von 65% bis zu teilweise 75%.

Zu sehen sind in Abb. 15: jeweils Energieverbrauch und produzierte Wasserstoffmenge, sowie der resultierende Wirkungsgrad (bezogen auf den HHV)

Kapazitätserweiterung HRS  
Freiburg,  
Arbeiten des Fraunhofer ISE

	Elektrolyse ohne Abschaltung		Elektrolyse mit Abschaltung	
	Exkl. Kühlung	Inkl. Kühlung	Exkl. Kühlung	Inkl. Kühlung
Energieverbrauch	338,50 kWh	409,00 kWh	326,30 kWh	390,90 kWh
Produktion	38,93 Nm <sup>3</sup>	38,93 Nm <sup>3</sup>	44,40 Nm <sup>3</sup>	44,40 Nm <sup>3</sup>
Wirkungsgrad	<b>41%</b>	<b>34%</b>	<b>48%</b>	<b>40%</b>

**Abb. 15: Wirkungsgradbestimmung Hogen (Elektrolyse) und Elektrolysecontainer (also inkl. Peripherie) mit und ohne Abschaltung**

In den acht Stunden Produktion wurden ca. 40 Nm<sup>3</sup> Wasserstoff produziert (Betrieb nicht bei voller Leistung). Während der 12 stündigen Standby-Phase wurden ohne Abschaltung 70 kWh verbraucht, was ca. 20% der benötigten Energie der 20 Stunden Betriebszeit entspricht. Durch die Nachrüstung wurde der Energieverbrauch in den Stillstandszeiten auf 26 kWh reduziert, was ca. 8 % der benötigten Energie der 20 Stunden Betriebszeit entspricht. Damit kann durch die Nachrüstung erheblich Energie eingespart werden. Dies gilt auch für andere On-Site-Elektrolyseanlagen, sofern sie einen ähnlich energieintensiven Standby-Modus haben und ein ähnliches Auslastungsprofil.

### 2.2.7 Mengemesser der Sick AG

Der Mengemesser der Firma Sick wurde erfolgreich nach dem 200 kW-Teststand installiert. Leider konnten noch keine Daten bis zum heutigen Zeitpunkt aufgenommen werden, da der 200 kW-Teststand noch nicht betriebsbereit ist.

## 2.3 Messungen mit dem Coriolis-Messer der HRS-Freiburg

Die Messungen der Hochschule Offenburg zur Validierung des alternativen Mengenmesssystems für H<sub>2</sub>-Tankstellen wurden an der Tankstelle des Fraunhofer ISE durchgeführt.

Da die Messungen sowieso durch einen Mitarbeiter des Fraunhofer ISE begleitet wurden, wurde die Gelegenheit genutzt, um gleichzeitig die Genauigkeit des in der Tankstelle eingebauten Coriolis Mengemessers zu bestimmen. Die Daten wurden einerseits genutzt, um die Genauigkeit des Mengemessers für die Auswertung der Wasserstoff-Verluste in Kapitel 2.2.5 zu bestimmen und andererseits an die CEP weitergegeben, um die dortigen Erfahrungen im Bereich Mengemessung um eine weitere Messreihe zu erweitern.

Zur Vergleichsmessung wurde der gravimetrische Teststand der Hochschule Offenburg verwendet. Teststand und Messvorgehensweise sind in Kapitel 3.9 und 3.10 näher beschrieben.

Beim in der H<sub>2</sub>-Tankstelle eingesetzten Sensor handelt es sich um einen Rheonic RHM-04 Baujahr 2013 mit Low-Flow-Kalibrierung (0 – 4 kg/min), der im Warmbereich der Tankstelle eingebaut ist. Laut mündlichen Aussagen hat Rheonic den Sensor in den folgenden Jahren weiter verbessert, d.h. ein aktueller Sensor könnte bessere Ergebnisse erzielen.

Durch den Einbau im Warmbereich wird ein sehr großer systematischer Fehler erwartet, d.h. der Wasserstoff-Durchfluss durch den Sensor weicht von dem Wasserstoff-Durchfluss in das Fahrzeug signifikant ab. Dies liegt darin begründet, dass der Sensor vor dem Wärmetauscher verbaut ist. Wenn bspw. vor der Betankung der Wärmetauscher einen Druck von 100 bar enthält und nach der Betankung einen Druck von 700 bar erreicht, misst der Sensor neben dem betankten Wasserstoff auch den Wasserstoff-Zuwachs im Wärmetauscher– dieser Wasserstoff strömt jedoch nicht in das Fahrzeug. Beim Wärmetauscher an der Freiburger HRS kann dieser Unterschied bis zu 200 g Wasserstoff betragen – bei einer Betankungsmenge von bspw. 2 kg (entspricht einem halbvollen Tank) sind dies 10% Fehler!

Die Ergebnisse können in 0 und Abb. 16: entnommen werden. Zu sehen sind die Messungen mit Start-Drücken, Enddrücken, sowie der tatsächlichen Betankungsmenge laut Teststand der Hochschule Offenburg. Daneben sind die relativen Messfehler, d.h. die Abweichung vom Realwert geteilt durch den Realwert angegeben. Ein Ergebnis von „-100%“ bedeutet also, dass die Betankung nicht erfasst wurde. Um die systemischen Fehler einheitlich zu halten, wurden für die Messungen die Startdrücke der Tankstelle (und damit des Wärmetauschers) vorab einheitlich auf ca. 700 bar erhöht. Als Vergleich wurden die Messungen außerdem rechnerisch auf einen Startdruck von 100 bar kompensiert – diese Ergebnisse sind in der Spalte ganz rechts zu sehen. Hierfür wurde anhand des geometrischen Volumens im Wärmeübertrager der Unterschied des Wasserstoff-Inhalts bei 100 bar und bei 700 bar berechnet und dem vom Coriolis-Sensor gemessenen Wert aufgeschlagen.

Die Resultate der Messung sind in 0 und Abb. 16: dargestellt.

In Abb. 16: sind die Ergebnisse grafisch dargestellt. Dargestellt sind außerdem die laut OIML 139 vorgeschriebenen Grenzwerte für eine eichfähige Betankung. (vgl. Kapitel 3.4)

Eine nähere Betrachtung oder Interpretation der Genauigkeit der Mengemessung benötigt weitere umfassende Untersuchungen. Dies ist nicht Fokus dieses Projektes und wird daher an dieser Stelle nicht durchgeführt.

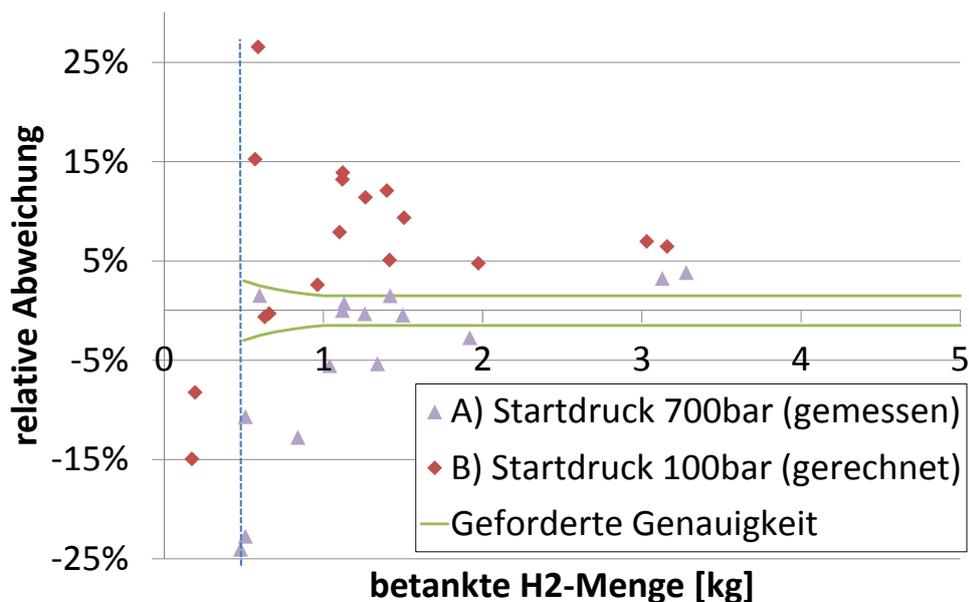


Abb. 16: Grafische Darstellung der Ergebnis der Messungen an der HRS Freiburg

Zeit / Datum	Start- druck [bar]	Enddruck [bar]	Betankungs -menge [kg]	relativer Messfehler HRS	Rel. Messfehler Startdruck 100 bar (gerechnet)
16.06.2016 10:00	20	Druckstoß	0,209	-100,0%	-29,2%
16.06.2016 10:18	47	Druckstoß	0,2	-100,0%	-26,0%
16.06.2016 10:37	74	Druckstoß	0,194	-84,5%	-8,2%
16.06.2016 10:53	101	Druckstoß	0,174	-100%	-15%
16.06.2016 15:40	298	Druckstoß	0,098	-100%	51%
19.05.2016 14:36	53	152	0,632	-24,1%	-0,6%
19.05.2016 17:18	50	177	0,66	-22,7%	-0,3%
23.05.2016 13:39	46	200	0,963	-12,8%	2,6%
25.05.2016 13:44	50	402	1,974	-2,7%	4,8%
12.05.2016 10:44	47	682	3,159	3,8%	6,5%
12.05.2016 15:25	70	680	3,032	3,2%	7,0%
16.06.2016 11:10	125	390	1,416	-5%	5%
23.05.2016 14:06	184	401	1,101	-5,5%	7,9%
16.06.2016 14:19	315	445	0,571	-11%	15%
16.06.2016 16:01	320	690	1,507	0%	9%
16.06.2016 13:10	357	713	1,399	2%	12%
25.05.2016 14:05	375	690	1,264	-0,3%	11,4%
25.05.2016 17:07	400	695	1,12	0,0%	13,2%
16.06.2016 14:34	433	732	1,122	1%	14%
25.05.2016 14:52	510	734	0,591	1,5%	26,6%

**Abb. 17: Ergebnis der Messungen an der HRS Freiburg; Tankgröße 4,14kg, Temperaturen 13 – 24 °C, SAE J2601:2010 ; detaillierte Tabelle im Anhang**

## 2.4 Arbeiten der ursprünglichen Arbeitspakete

Vor dem Änderungsantrag war die Aufgabe des Fraunhofer ISE im Projekt die Erweiterung der bestehenden Elektrolyse-Teststände, um den entstehenden Wasserstoff an der H<sub>2</sub>-Tankstelle des Fraunhofer ISE zu nutzen. Diese Arbeiten waren bis zu einer ausschreibefähigen Planung gediehen, d.h. es existieren Sicherheitsbetrachtungen, R&I-Schemata, 3D-Zeichnungen, Ausschreibungsunterlagen und Vorgespräche mit Firmen bzw. erste Richtpreisangebote.

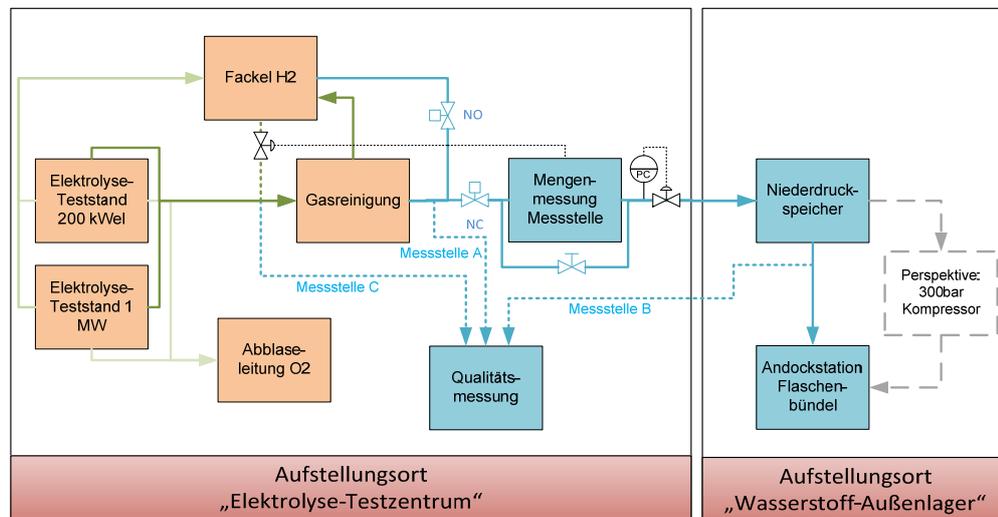
Das entwickelte Konzept ist schematisch in Abb. 18: dargestellt.

Im Rahmen eines anderen Projektes wurden die Elektrolyse-Teststände installiert und um eine Fackel und Abblaseleitung erweitert. Zudem sollte auch eine Gasreinigung zur Reinigung des Wasserstoffs installiert werden.

Im Rahmen des vorliegenden Projektes sollte diese Anlage dann erweitert werden, um:

- Reinheitsmessung
- Mengenummessung + Regler
- Niederdruckpufferspeicher
- Füllstation Flaschenbündel

Die Reinheits-/Qualitätsmessung der SICK sollte integriert werden, um die Qualität des gereinigten Wasserstoff permanent zu überprüfen und bei einem Versagen der Gasreinigung eine Verunreinigung des gespeicherten Wasserstoffs direkt zu vermeiden.



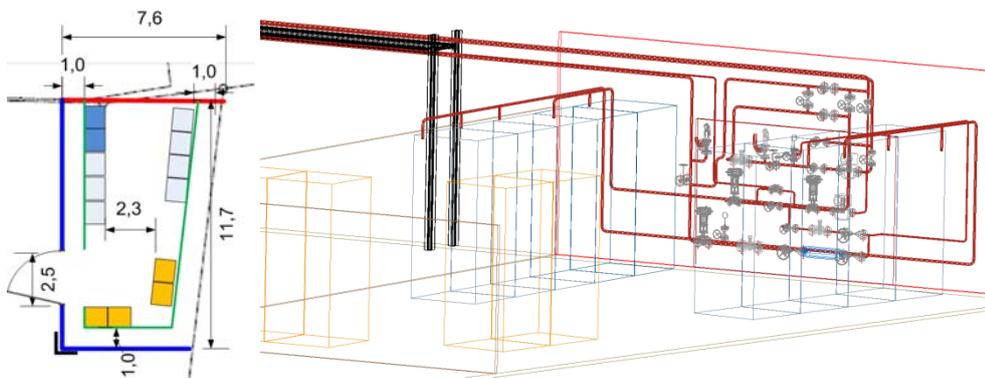
**Abb. 18: Schematische Darstellung ursprünglich geplante Erweiterung Elektrolyse-Testzentrum**

Die Teststände liefern zusammen einen Durchfluss zwischen 0 und 220 Nm<sup>3</sup>/h, der vom Betrieb und dem installierten Stack abhängen. Bei einem Stack unterhalb der maximalen Teststandsgröße (bspw. 500 kW im 1MW-Teststand) ist der maximale Durchfluss bspw. 100 Nm<sup>3</sup>/h. Zudem kann der Stack-Druck in großen Bereichen zwischen wenigen bar und 50 bar verändert werden. Dies bedeutet, dass die Arbeitsvolumenströme in der Gasreinigung (nach Vergleich und Firmengesprächen fiel die Wahl auf eine Kombination aus Deoxidationsreaktor und TSA direkt hinter den Testständen) in sehr großen Bereichen schwanken, was für die Gasreinigung problematisch ist. Daher wurde sich in der Spezifikation auf einen limitierten Druck- und Volumenstrombereich festgelegt. Der Mengemesser des Partners SICK soll neben der Messung des erzeugten Wasserstoffs auch den aktuellen Volumenstrom messen. Volumenströme außerhalb der o.g. Spezifikation werden vor der Fackel durch eine

Ventilöffnung vor der Fackel abgeblasen, um eine Beschädigung der Gasreinigung zu vermeiden.  
 Der erzeugte Wasserstoff sollte dann in einem großen Niederdruckspeicher gespeichert werden und bei Bedarf in die Flaschenbündel abgefüllt werden. Perspektivisch war außerdem ein 300 bar Verdichter geplant, der eine bessere Ausnutzung der Flaschenbündel ermöglicht hätte.

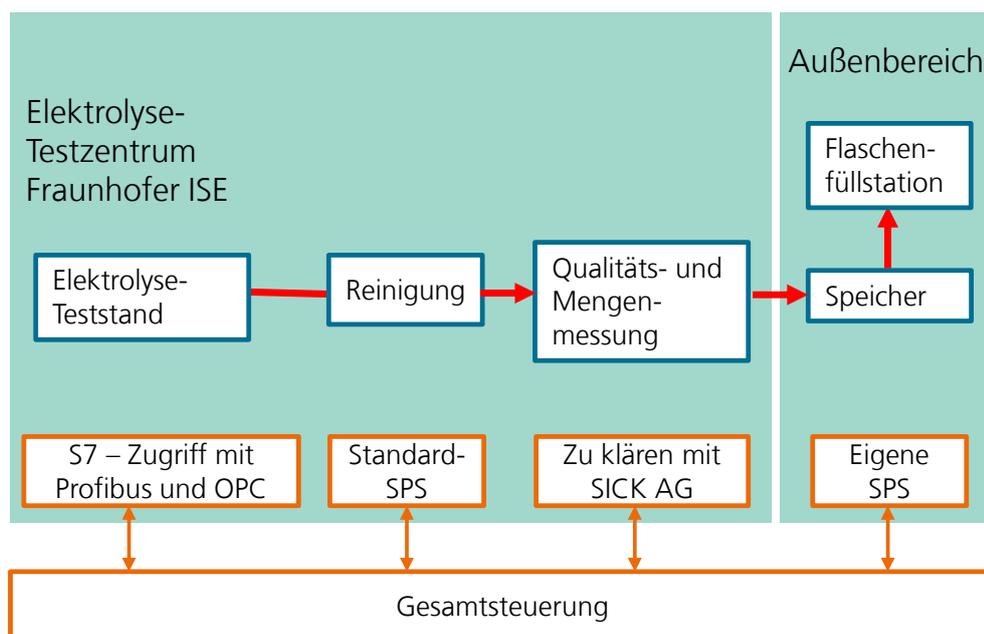
Bezüglich Aufstellung war eine Integration von Mengenmessung und Qualitätsmessung im klimatisierten Technikum geplant (bessere Messgenauigkeit der Sensoren). Eine Aufstellung von Niederdruckspeichern und der Flaschenfüllstation müsste aus Sicherheits- und Platzgründen außerhalb des Gebäudes geschehen. Hier wurde ein Platz am Rande des Grundstückes hinter dem Gebäude gewählt, der durch eine Zufahrt gut erreichbar gewesen wäre.

Im Außenbereich war geplant, gemäß Brandschutzkonzept eine F-90 Wand zum Nachbargrundstück zu errichten und dort auch die Armaturen zu befestigen (vgl. Abb. 19:). Für die Lagerung vor Ort waren 7 Bündel vorgesehen. Platz für eine perspektivische Verdichternachrüstung war im entsprechend abgezaunten Bereich reserviert.



**Abb. 19: Draufsicht und 3D-Ansicht Wasserstoff-Außenlager**

Zudem hatten auch Vorgespräche mit Elektrolyse-Firmen stattgefunden, mit dem Ziel einen für die Mengenmessung passenden Zellstapel zu erwerben.



**Abb. 20: Konzept Steuerungsarchitektur**

Die entsprechenden Planungsunterlagen wurden für eine spätere Nutzung archiviert.

Da jedoch eine entsprechende Koppelung der Anlage mit einer Flaschenfüllstation ein förmliches Verfahren nach Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) bedeuten würde, ist eine zukünftige Umsetzung am Fraunhofer ISE äußerst unwahrscheinlich. Die theoretische Weiterverwertung der Erkenntnisse und Planungen in anderen Projekten wird jedoch aktuell betrieben. Beispiele dafür sind die Modellierung einer Gasreinigungsstufe, Verwendung der Richtpreisangebote und Kalkulationen für Kostenmodelle, Verwendung der erarbeiteten Steuerungsstruktur in anderen Projekten.

---

Kapazitätserweiterung HRS  
Freiburg,  
Arbeiten des Fraunhofer ISE

---

# 3 Entwicklung Mengenummessung HRS, Arbeiten der Hochschule Offenburg

**Autor:** A. Dietsche und Prof. U. Hochberg (Hochschule Offenburg)

## 3.1 Eichfähige Mengenummessung von Betankungsvorgängen an Wasserstofftankstellen

Ein bisher ungelöstes Problem für die kommerzielle Nutzung von Wasserstoffbetriebebenen Fahrzeugen ist die eichfähige Mengenummessung bei der Betankung. Bisher auf dem Markt befindliche Durchflussmesser für Wasserstofftankstellen arbeiten nach dem Coriolis-Prinzip und erreichen nicht die geforderten Messunsicherheiten.

Ziel des Arbeitspakets der Hochschule Offenburg ist die Entwicklung eines neuen Ansatzes zur eichfähigen Mengenummessung. Notwendige Bedingung für die Eichfähigkeit ist zum einen eine ausreichende Messrichtigkeit, zum anderen muss Messbeständigkeit sichergestellt werden. Hierzu gehören beispielsweise Manipulationssicherheit, Elektromagnetische Verträglichkeit und Sensorbeständigkeit. Aufgrund der geforderten Manipulationssicherheit kommen Messmethoden wie bspw. das Wiegen der Fahrzeuge oder Tanksysteme nicht infrage, da diese vom Verbraucher beeinflusst werden können. Deshalb soll ein Durchflussmesser basierend auf dem Düsenmessverfahren entwickelt werden.

Im Rahmen des Projektes wurden zunächst die Rahmenbedingungen bei Wasserstoffbetankungsvorgängen nach der Norm SAE J2601 erarbeitet. Basierend darauf wurde ein dynamisches Simulationsmodell entwickelt, welches die Berechnung der zeitlich veränderlichen Massen- und Volumenströme während der Betankung ermöglicht. Diese dienen als Grundlage für die Auslegung der Düsengeometrie sowie der benötigten Temperatur- und Druckmesstechnik. Parallel zu dem Durchflussmessgerät wurde ein gravimetrischer Teststand entwickelt, welcher es ermöglicht, die Messgenauigkeit der Düse zu untersuchen. Der Teststand ist mit einem Wasserstofftank ausgestattet, welcher während Betankungsversuchen befüllt werden kann um realistische Strömungsbedingungen zu erreichen. Während den anschließenden Versuchen an der Wasserstofftankstelle des Fraunhofer ISE in Freiburg konnte gezeigt werden, dass die Messdüse sowie der Teststand funktionieren und das Düsenmessverfahren ein geeignetes Verfahren für Durchflussmessungen an Wasserstofftankstellen darstellt. Es konnten Messunsicherheiten im Bereich der Eichfähigkeit (um 1 %) erreicht werden.

## 3.2 Rahmenbedingungen der Norm SAE J2601

### 3.2.1 Grundlagen der SAE J2601

Die Norm SAE J2601 scheint sich international als Standard für Betankungen an Wasserstofftankstellen zu etablieren. So richten sich sämtliche H<sub>2</sub>-Tankstellen in Deutschland nach der SAE J2601. Die Norm unterscheidet zwei Druckklassen anhand ihrer Zieldrücke (Nominal Working Pressure, NWP): 350 bar und 700 bar.

Der Wasserstoff ist in dem Betriebsfeld der Norm immer gasförmig und somit kompressibel. Der Füllstand (State Of Charge, SOC) wird hier anhand des Zieldruckes und einer Referenztemperatur von 15 °C über die Dichte des Gases ermittelt, vgl. Gl. Formel 1.

$$SOC(\%) = \frac{\rho(p, T)}{\rho(NWP, 15^\circ C)} \cdot 100\%$$

**Formel 1**

Bei einem Druck von 350 bar und 15 °C erreicht der Wasserstoff im Tank eine Dichte von 24 g/L, bei 700 bar und 15 °C werden laut Norm 40,2 g/L erreicht. Die Temperatur im Tank darf nach Norm maximal auf +85 °C steigen. In diesem Fall steigt der Druck bei einer Dichte von 40,2 g/L auf bis zu 875 bar. Im Leerzustand soll der Tank einen Mindestdruck von 20 bar nicht unterschreiten.

Nach der Norm sind Tankvolumen von 49,7 bis 248,6 Liter zulässig. Damit können bei dem kleinsten Tankvolumen etwa 2 kg und bei dem größtmöglichen Tankvolumen bis zu 10 kg Wasserstoff gespeichert werden.

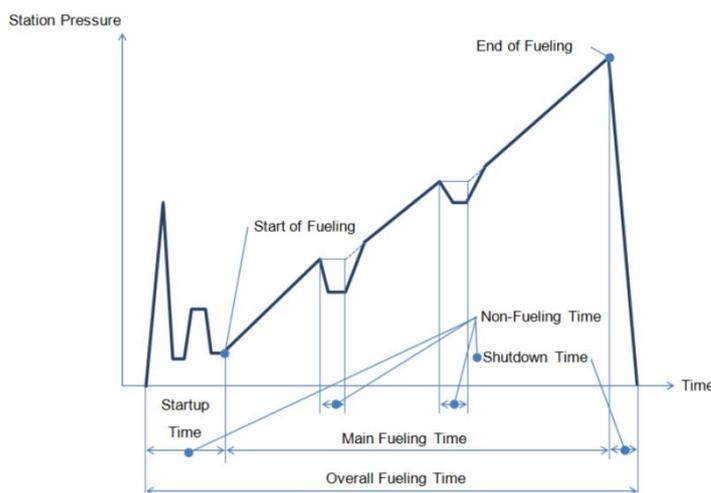
Durch den Enthalpiestrom während der Betankung kann sich die innere Energie und somit die Temperatur des Wasserstoffs im Tank deutlich erhöhen. In der 350 bar Klasse kann der Wasserstoff noch mit Umgebungstemperatur in den Tank gefüllt werden, bei der 700 bar Klasse hingegen ist eine Vorkühlung notwendig um die Endtemperatur des Gases im Tank in dem zulässigen Bereich zu halten. Hier sind drei verschiedene Temperaturklassen definiert T40 mit -40 °C sowie T30 mit -30 °C bzw. T20 mit -20 °C Vorkühltemperatur.

In der Praxis scheint sich aufgrund der höheren Speicherkapazitäten die 700 bar Klasse durchzusetzen. Bei den Temperaturklassen wird in der Regel die Vorkühlung mit -40 °C verwendet.

Ziel bei der Entwicklung des Messgeräts ist es, die 700 bar Druckklasse bei einer Vorkühlung von -40 °C zu beherrschen. In diesem Fall können alle anderen Betriebsbereiche der SAE J2601 mit eingeschlossen werden.

### 3.2.2

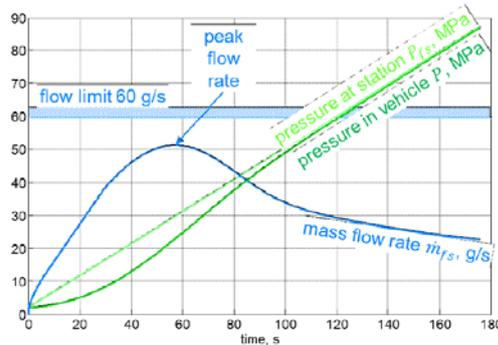
#### Ablauf der Betankung



**Abb. 21: Druckverlauf während der Betankung [2]**

Der zeitliche Verlauf des Drucks in der Tankstelle ist in Abb. 21: dargestellt. In der „Startup Time“ erfolgt ein kurzer Druckstoß (Connection Pulse). Zur Dichtigkeitsprüfung wird anschließend für einige Sekunden der Druck im System gehalten. Ein Druckabfall während dieser Wartezeit deutet auf eine mögliche Leckage hin und bricht den Tankvorgang ab. Während der „Main Fueling Time“ wird der Druck

Tankstellenseitig durch ein Regelventil annähernd linear bis zum Erreichen des Zieldrucks erhöht. Die durchschnittliche Druckanstiegsrate (Average Pressure Ramp Rate, APRR) ist abhängig von Parametern wie der Vorkühlungs- und der Umgebungstemperatur und wird in Tabellen der SAE J2601 definiert. Durch die gleichmäßige Erhöhung des Tankstellenseitigen Drucks kann die Druckdifferenz zum Fahrzeug und somit der Massenstrom im zulässigen Bereich von bis zu 60 g/s gehalten werden (vgl. Abb. 22:).

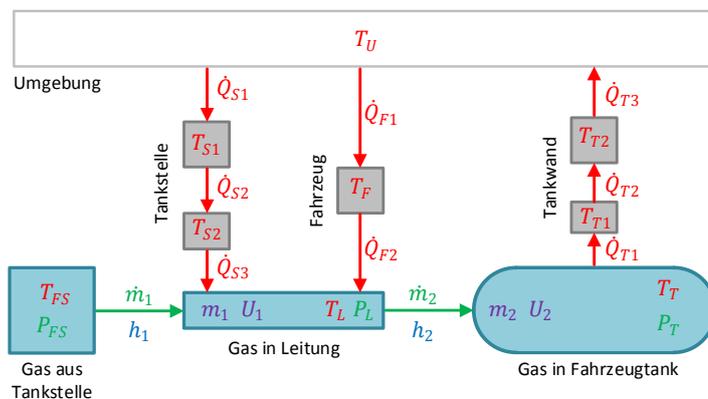


**Abb. 22: Zeitlicher Verlauf des Drucks von Tankstelle und Fahrzeug und dazugehöriger Massenstrom [2]**

### 3.3

## Dynamisches Simulationsmodell zum Berechnen der Volumen- und Massenströme

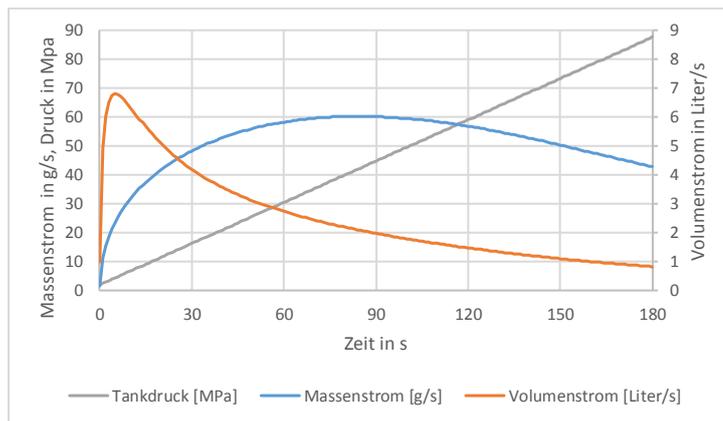
Zum Auslegen des Durchflussmessgeräts müssen die im Betriebsfeld der Norm auftretenden minimalen und maximalen Massen- bzw. Volumenströme bekannt sein. Dafür wurde mit Matlab/Simulink ein dynamisches Simulationsmodell entwickelt. Dieses versucht, den Tankvorgang möglichst realitätsgetreu nachzubilden. Abb. 23: zeigt den schematischen Aufbau des Simulationsmodells. Es werden sowohl die auftretenden Massenströme, als auch die Energieströme zwischen Tankstelle und Fahrzeug berücksichtigt. Das Gas strömt aufgrund der auftretenden Druckdifferenz in ein Volumen, welches die Leitungen in Tankstelle und Fahrzeug nachbildet. Zwischen dem Volumen und der Umgebung kann Wärme übertragen werden. Anschließend strömt das Gas in den Fahrzeugtank. Durch die über den Massenstrom zugeführte Enthalpie erhöht sich die innere Energie des Tanks – die Temperatur des Gases steigt. Der deshalb auftretende Wärmestrom vom Tank an die Umgebung ist ebenfalls in die Simulation implementiert.



**Abb. 23: Aufbau des Simulationsmodells mit Massen- und Energieströmen**

Die auftretenden Massen- und Volumenströme sind im Wesentlichen abhängig von der Druckanstiegsrate (APRR) sowie dem Tankvolumen. Die maximalen Massen- und

Volumenströme treten bei einem Tankvolumen von 248,6 Litern auf. Die Simulationsdaten in Abb. 24: basieren auf einer APPR von 28,5 MPa/min. Zu erkennen ist, dass der Volumenstrom (blaue Linie) direkt zu Beginn der Betankung deutlich stärker ansteigt als der Massenstrom. Er erreicht ein kurzes Maximum 6,8 L/s und sinkt danach kontinuierlich bis zu 0,9 L/s am Ende der Betankung. Der Massenstrom (orange) unterliegt geringeren Schwankungen und erreicht maximal 60 g/s. Begründet liegt dies in der stark ansteigenden Dichte des Wasserstoffs von 1,7 g/Liter zu Beginn der Betankung (20 bar, 15 °C) auf bis zu 40,2 g/Liter (700 bar, 15 °C).



**Abb. 24: Maximale Massen- und Volumenströme ermittelt mit dynamischem Simulationsmodell**

Es tritt ein maximaler Volumenstrom von 6,8 Liter/s auf. Der maximale Massenstrom beträgt knapp 60 g/s und tritt aufgrund der ansteigenden Dichte später auf.

	Minimum	Maximum
Volumenstrom (Liter/s)	0,14	6,8
Massenstrom (g/s)	5	60
Zugehöriger Leitungsdruck (bar)	700	34

**Abb. 25: Betriebsfeld des Durchflussmessgeräts basierend auf den Simulationsergebnissen**

In Abb. 25: zusammengefasst sind die im Betriebsfeld der SAE J2601 auftretenden maximalen und minimalen Massen- und Volumenströme. Die Volumenströme schwanken von 0,14 Liter/s bis 6,8 L/s. Dies entspricht einer Messspanne von 1/48. Daraus abgeleitet wird die Anforderung an das Durchflussmessgerät, Volumenströme im Bereich 0,1 bis max. 7 Liter/s ausreichend genau messen zu können.

### 3.4

#### Anforderungen an die Messrichtigkeit nach OIML R139

Die Internationale Richtlinie OIML R139 (Edition 2014) [7] definiert metrologische und technische Anforderungen an Messsysteme für Fahrzeuge mit komprimiertem Gas als Kraftstoff.

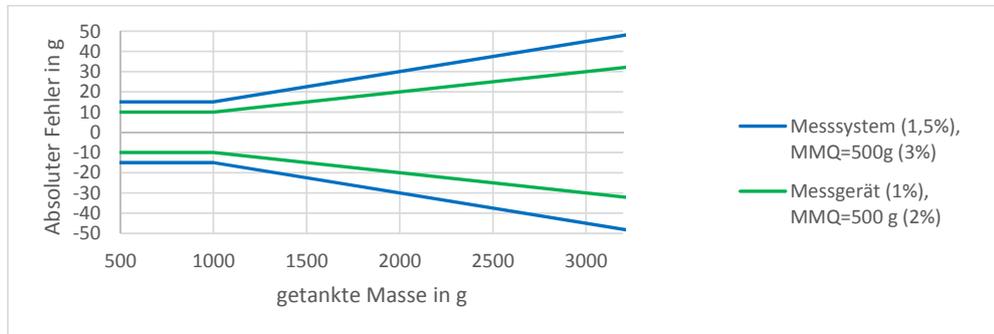
Nach Rücksprache mit der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) werden die in der OIML R139 definierten Grenzwerte voraussichtlich für die Messrichtigkeit von Wasserstofftankstellen in Deutschland übernommen.

Für das Messgerät wird ein zulässiger Messfehler von 1 % vorgegeben, um eine Eichzulassung erhalten zu können. Da in der Tankstelle neben dem Messgerät noch weitere Einflussfaktoren vorhanden sind, welche den Messfehler erhöhen können (bspw. Rohrvolumen zwischen Messgerät und Zapfpistole) darf das Gesamtsystem einen Fehler von bis zu 1,5 % aufweisen. Das Messgerät darf damit prinzipiell in

einzelnen Betriebspunkten einen höheren Messfehler als 1 % ausweisen, wenn der Gesamtfehler der Tankstelle die zulässigen 1,5 % nicht überschreitet. Weiterhin wird eine Mindestabgabemenge (Minimum Measured Quantity, MMQ) definiert, ab welcher die Fehlergrenzen einzuhalten sind. Sie ist abhängig vom größtmöglichen Massenstrom während der Betankung und darf bei einem Betankungsvorgang nach SAE J2601 maximal 500 g betragen (vgl. Abb. 26:). Bei der Mindestabgabemenge (MMQ) gilt der doppelte zulässige Fehler: das Messgerät darf max. 2 %, das gesamte Messsystem max. 3 % Messunsicherheit aufweisen.

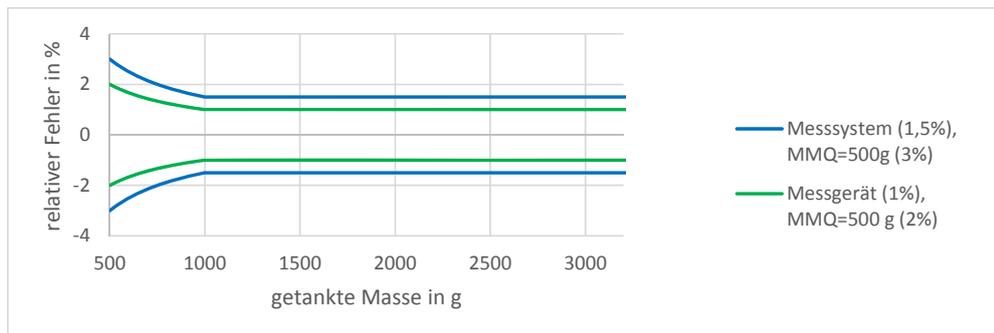
$\dot{m}_{\max} \leq 66,6$	$66,6 < \dot{m}_{\max} \leq 200$	$200 < \dot{m}_{\max} \leq 500$	$500 < \dot{m}_{\max} \leq 1166$	$\dot{m}_{\max} > 1166$	g/s
MMQ ≤ 500	1000	2000	5000	10000	g

**Abb. 26: Zulässiger Höchstwert für die Mindestabgabemenge (MMQ) in Abhängigkeit des max. Massenstroms [7]**



**Abb. 27: Zulässiger absoluter Messfehler in g in Abhängigkeit der getankten Masse nach OIML R139**

In Abb. 27: wird der Verlauf des zulässigen absoluten Messfehlers grafisch veranschaulicht. Bei der Mindestabgabemenge von 500 g gilt für das Messgerät ein zulässiger Messfehler von 2 % (entspricht hier 10 g). Diese 10 g bleiben so lange zulässige Fehlergrenze, bis der relative Fehler des Messgeräts von 1 % in Abhängigkeit der getankten Masse größer ist (hier ab 1000 g getankter Masse). In Abb. 28: wird der daraus abgeleitete zulässige relative Fehler grafisch dargestellt. Dieser beträgt bei der Mindestabgabemenge 3 % und sinkt anschließend auf 1,5 % ab 1000 g getankter Masse.

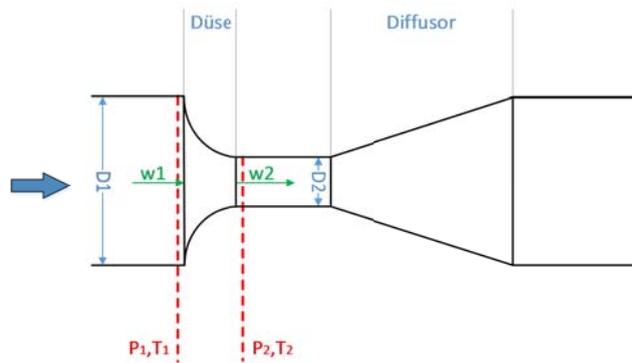


**Abb. 28: Zulässiger relativer Messfehler in Abhängigkeit der getankten Masse nach OIML R139**

Das zu entwickelnde Durchflussmessgerät sollte zum Erreichen der Eichfähigkeit die nach OIML R139 definierte zulässige Fehlergrenze von 1 % einhalten. Die Tankstelle als Gesamtsystem muss in jedem Fall einen Messfehler von 1,5 % einhalten.

### 3.5 Differenzdruckmessverfahren

Als Messprinzip für die Durchflussmessung soll das Differenzdruckverfahren dienen. Um den Druckverlust gering zu halten, wird eine Venturidüse eingesetzt (Abb. 29:). Eine Venturidüse besteht aus einer Düse mit direkt anschließendem Diffusor um den Druckverlust möglichst gering zu halten.



**Abb. 29: Schematischer Aufbau einer Venturidüse**

#### 3.5.1 Thermodynamische Grundlagen für die Differenzdruckmessung

Als Grundlagen für die Differenzdruckmessung dienen der erste Hauptsatz für stationäre offene Systeme (Formel 2) sowie der Kontinuitätssatz für kompressible Medien (Formel 3). Die zeitliche Änderung der inneren Energie des Systems kann in guter Näherung vernachlässigt werden, da sie wesentlich kleiner ist als der Enthalpiestrom. Zur Anwendung des ersten Hauptsatzes wird zwischen zwei Messebenen vor und nach der Düse bilanziert (vgl. Abb. 29:).

$$0 = \sum_i \dot{Q}_i + \sum_j W_{t,j} + \sum_e \dot{m}_e \cdot \left( h_e + g z_e + \frac{1}{2} c_e^2 \right) - \sum_a \dot{m}_a \cdot \left( h_a + g z_a + \frac{1}{2} c_a^2 \right) \quad \text{Formel 2}$$

$$\int_{A_e} \rho_e c_e dA = \int_{A_a} \rho_a c_a dA \quad \text{Formel 3}$$

Unter der Annahme, dass die Dichte und die Geschwindigkeit im Querschnitt konstant sind, vereinfacht sich der Kontinuitätssatz zu:

$$A_e \cdot \rho_e \cdot c_e = A_a \cdot \rho_a \cdot c_a \quad \text{Formel 4}$$

Zwischen den beiden Messebenen wird keine technische Arbeit verrichtet, die geodätische Höhe ist identisch und der eintretende Massenstrom entspricht in guter Näherung dem austretenden Massenstrom. Unter der Annahme, dass der Druck und die Temperatur in beiden Messebenen erfasst werden, sind evtl. auftretende Druckverluste durch Reibung berücksichtigt. Wenn darüber hinaus der Wärmestrom vernachlässigt wird, vereinfacht sich der erste Hauptsatz zu:

$$0 = h_e - h_a + \frac{1}{2}(c_e^2 - c_a^2)$$

**Formel 5**

Entwicklung Mengenummessung  
HRS,  
Arbeiten der Hochschule  
Offenburg

Durch Einfügen des Kontinuitätssatzes in den vereinfachten ersten Hauptsatz (Formel 5) kann auf die mittlere Strömungsgeschwindigkeit im Austritt geschlossen werden:

$$\bar{c}_a = \sqrt{\frac{2 \cdot (h_a - h_e)}{\left(\frac{A_a}{A_e}\right)^2 \cdot \left(\frac{\rho_a}{\rho_e}\right)^2 - 1}}$$

**Formel 6**

Weiterhin gilt der folgende Zusammenhang zwischen Strömungsgeschwindigkeit und Massenstrom:

$$\dot{m} = \bar{c}_a \cdot \rho_a \cdot A_a$$

**Formel 7**

Die Drücke bewegen sich während des Betankungsvorgangs nach SAE J2601 im Bereich 20 bar bis 875 bar, die Temperaturen liegen zwischen -40 °C und +85 °C. Um genaue Werte für die Enthalpie und Dichte bestimmen zu können, ist ein exaktes Realgasmodell notwendig. Im Zuge einer Recherche wurde das thermische Zustandsmodell von Leachman et. al. von der University of Idaho [1] als genauestes Modell identifiziert. Die Genauigkeiten des Modells für Dichte und Wärmekapazität sind für den relevanten Druck- und Temperaturbereich in Abb. 30: zusammengefasst.

	Temperaturbereich	Druckbereich	Genauigkeit
Dichte	100 – 250 K	0 – 40 MPa	0,1 %
	250 – 450 K	0 – 300 MPa	0,04 %
Enthalpie	13,9 – 1000 K	0 – 2000 MPa	1 %

**Abb. 30: Genauigkeiten von Dichte und Enthalpie der verwendeten Zustandsgleichung [1]**

### 3.6

#### Werkstoffauswahl

Der Werkstoff der Messdüse muss zum einen eine möglichst hohe Streckgrenze besitzen, um Drücke von bis zu 875 bar ohne plastische Verformungen auszuhalten. Zum anderen muss er aufgrund der Vorkühlung eine hohe Kältebeständigkeit aufweisen und unempfindlich gegenüber Wasserstoffversprödung sein.

Im Bereich der Hochdrucktechnik werden für Wasserstoff meist austenitische Chrom-Nickel-Stähle eingesetzt. Der Werkstoff X2CrNiMo17-12-2 (1.4404) gilt aufgrund langjähriger Praxiserfahrungen als unempfindlich gegenüber Wasserstoffversprödung. Als austenitischer Stahl besitzt er außerdem eine hohe Kältebeständigkeit und ist bei vielen Wasserstofftankstellen im Einsatz.

Die Messdüse wird deshalb aus 1.4404 gefertigt.

### 3.7

#### Auslegung der Geometrie des Strömungskanal

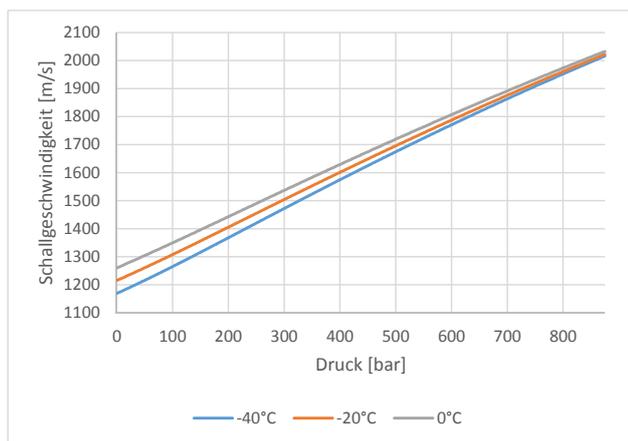
Durch den verringerten Querschnitt in der Düse (siehe Abb. 29:) wird die Strömung beschleunigt, gleichzeitig sinkt der statische Druck. Der Differenzdruck vor und hinter der Düse wird bei geringeren Durchmesserhältnissen  $\beta = d_2/d_1$  größer. Das Ziel der Auslegung der Düsengeometrie ist zum einen die Abdeckung des ganzen Betriebsfelds

nach SAE J2601 und zum anderen ein möglichst großer Differenzdruck. Damit kann der relative Messfehler minimiert werden, welcher aus der Messunsicherheit bei der Druckmessung resultiert. Dabei müssen zwei Randbedingungen eingehalten werden:

1. Die Strömungsgeschwindigkeit im kleinsten Querschnitt muss bei dem größtmöglichen Volumenstrom im Betriebsfeld der Norm unterkritisch bleiben, da die Düse sonst sperrt (Laval-Düse)
2. Mit zunehmendem Querschnitt steigen die Spannungen in den Bauteilen. Die Vergleichsspannung im größten Querschnitt darf die Streckgrenze des Stahls nicht überschreiten.

### 3.7.1 Ermittlung des Taillendurchmessers $d_2$

In Abb. 31: ist die Schallgeschwindigkeit von Wasserstoff im für den bei der Betankung relevanten Temperatur- und Druckbereich dargestellt. Bei Umgebungsdruck beträgt die Schallgeschwindigkeit etwa 1200 m/s und erhöht sich mit steigendem Druck auf über 2000 m/s bei 875 bar. Die Gastemperatur zwischen 0 und  $-40\text{ °C}$  hat einen geringeren Einfluss: Bei niedrigen Drücken sinkt die Schallgeschwindigkeit mit der Temperatur leicht ab.



**Abb. 31: Schallgeschwindigkeit von Wasserstoff in Abhängigkeit von Temperatur und Druck**

Wie in Abb. 24: gezeigt wird, tritt der maximal mögliche Volumenstrom von 6,8 L/s nach der Simulation bereits zu Beginn der Betankung auf. Unter der Annahme, dass die Betankung bei 20 bar gestartet wird, erreicht der Volumenstrom bereits bei einem Leitungsdruck von etwa 34 bar sein Maximum. In diesem Betriebspunkt strömen laut Simulation ein Massenstrom von 23 g/s durch die Düse. Dies entspricht einer Dichte von etwa 3,4 g/L. Zur Bestimmung des optimalen Taillendurchmessers der Düse wurde ein adiabates Simulationsmodell verwendet. Die Randbedingungen der Simulation sind in 0 zusammengefasst.

Parameter	Größe
$d_1$ /mm	10
$d_2$ /mm	3,2-3,5
$\dot{m}$ /(g/s)	23
T1 /K	233
$p_{D abs} = p_{outlet abs}$ /kPa	3400
Tetraedergröße /mm	0,25
Stoppkriterium mittl. Residuengröße (RMS)	10-5
Y+	30

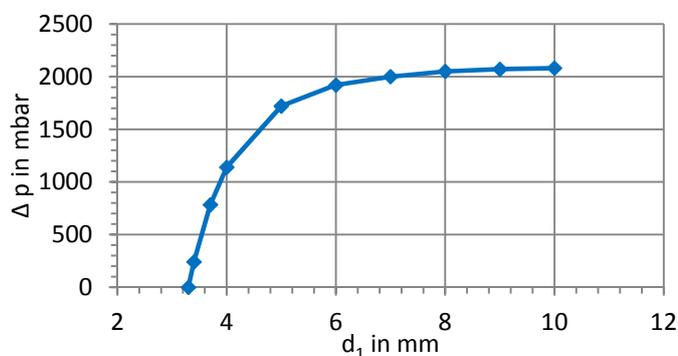
Entwicklung Mengenummessung  
HRS,  
Arbeiten der Hochschule  
Offenburg

**Abb. 32: Randbedingungen der Simulation zur Ermittlung des Taillendurchmessers**

Die Simulation mit Ansys Fluent ergibt einen optimalen Taillendurchmesser  $d_2 = 3,3$  mm für das ermittelte Betriebsfeld, welcher für die Konstruktion der Messdüse verwendet wird. Bei der vorliegenden Simulation wird eine maximale Strömungsgeschwindigkeit von 1050 m/s erreicht. Die Machzahl ist demnach  $Ma=0,875$ .

### 3.7.2 Ermitteln des Einlaufdurchmessers $d_1$

Als Grundlage für die Ermittlung des Einlaufdurchmessers  $d_1$  dient ein Taillendurchmesser von  $d_2=3,3$  mm. Mit einem isentropen Simulationsmodell wurde der Einfluss des Einlaufdurchmessers auf den Differenzdruck untersucht. Als Betriebspunkt wird ein Massenstrom von 10 g/s bei einem Leitungsdruck von 34 bar gewählt.

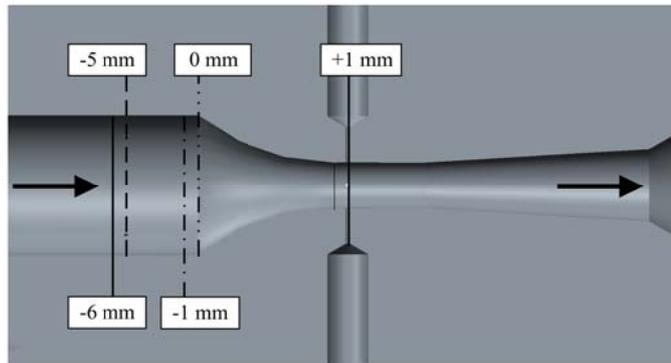


**Abb. 33: Differenzdruck in der Düse in Abhängigkeit von  $d_1$  bei konstantem  $d_2=3,3$  mm (10 g/s; 34 bar)**

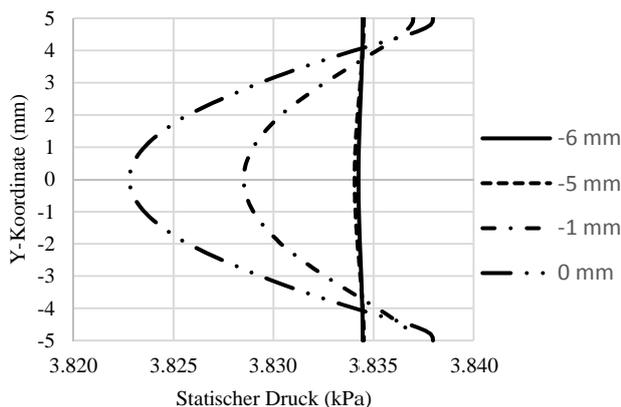
Abb. 33: stellt den Differenzdruck bei variierendem Einlaufdurchmesser  $d_1$  dar. Dabei wird  $d_2=3,3$ mm konstant gehalten. Es ist ersichtlich, dass eine Vergrößerung von  $d_1$  zunächst eine starke Zunahme des Differenzdrucks verursacht, dieser sich jedoch asymptotisch einem Wert annähert. Daher ist es sinnvoll den Durchmesser nicht zu groß zu wählen, weil der Differenzdruck ab 8 mm nicht mehr wesentlich erhöht wird. In Bezug auf eine zusätzlich zu betrachtende, steigende mechanische Belastung der Düse wird daher der Einlaufdurchmesser auf  $d_1=10$  mm festgelegt.

### 3.7.3 Positionierung der Druckmessbohrungen

Der Druck innerhalb der Messebene sollte zur korrekten Bilanzierung im ersten Hauptsatz (vgl. Kap. 3.5.1) möglichst konstant sein. Deshalb wird an beiden Messebenen der Einfluss einer axialen Verschiebung auf die Druckprofile mit Hilfe einer CFD-Simulation untersucht. Die Strömungsgrößen für die Simulation entsprechen dem Betriebspunkt mit maximalem Volumenstrom (siehe Abb. 25:). In Abb. 34: sind die verschiedenen untersuchten Messebenen dargestellt, die zugehörigen Druckprofile werden in Abb. 11 gezeigt.



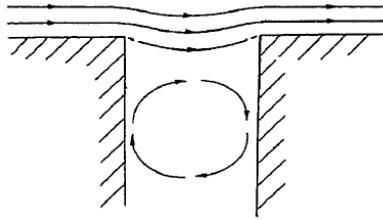
**Abb. 34: Untersuchte  
Druckprofile vor und  
hinter der Düse**



**Abb. 35: Druckprofile bei  
axialer Verschiebung vor  
der Düse**

Grundsätzlich ist eine Druckmessung möglichst nah an der Düse sinnvoll, um etwaige Druckverluste aufgrund von Rohrreibung gering zu halten. In Abb. 35: ersichtlich ist eine zunehmende Krümmung des Druckprofils bei abnehmendem Abstand zur Düse. Eine Positionierung der Druckmessbohrung direkt an die Düse erscheint daher nicht optimal. Die relative Druckabweichung im Bezug zum arithmetisch gemittelten Druck beträgt direkt an der Düse 0,24% und 5 mm stromaufwärts 0,006 %, weshalb letzteres als Position für die Konstruktion der Düse gewählt wird. Die gleiche Vorgehensweise wird auch bei der Taillendruckentnahme (Messebene 2) durchgeführt. Dabei wird die Messebene 1mm stromabwärts vom Düsenende platziert, bei der eine Druckabweichung in Bezug zum arithmetisch, gemittelten Druck von 0,01% errechnet wird.

### 3.7.4 Auslegung der Druckmessbohrung



Entwicklung Mengenummessung  
HRS,  
Arbeiten der Hochschule  
Offenburg

**Abb. 36: Skizze einer  
Druckmessbohrung [3]**

Druckmessbohrungen (im weiteren DMB genannt) werden eingesetzt, um den statischen Druck zu messen, der in einer Strömung vorliegt. In einer realen Strömung ist dies aufgrund der inneren Reibung fehlerbehaftet. Es bildet sich ein Strömungswirbel in der Bohrung, der dazu führt, dass an der hinteren Kante ein Teil der Hauptströmung hinein - und an der vorderen hinauffließt. Dabei wird in die Bohrung (siehe 0) durch den Pitot-Effekt mehr kinetische Energie eingeführt, als der Wirbel an die Rohrströmung abgeben kann, wodurch sich der statische Druck in der DMB erhöht. Diese Abweichung der Druckmessung führt bei der Messung in der Düse zu einem Messfehler, der vor allem im Tailenbereich, bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten zum Tragen kommt.

Aus der Literatur [3][4][5] ist bekannt, dass der statische Druckfehler bei geringerem Bohrungsdurchmesser und kleineren Strömungsgeschwindigkeiten abnimmt. Da im Tailenbereich hohe Strömungsgeschwindigkeiten auftreten können, wird der Durchmesser der DMB so klein wie fertigungstechnisch möglich gewählt ( $d_{DMB}=0,3$  mm). Weiterhin muss die Innenkante der DMB zum Strömungskanal gratfrei und möglichst scharf (kein Kantenbruch) sein [4]. In der Fertigung werden daher zunächst die DMB tiefer gebohrt und der Strömungskanal quer dazu senkerodiert.

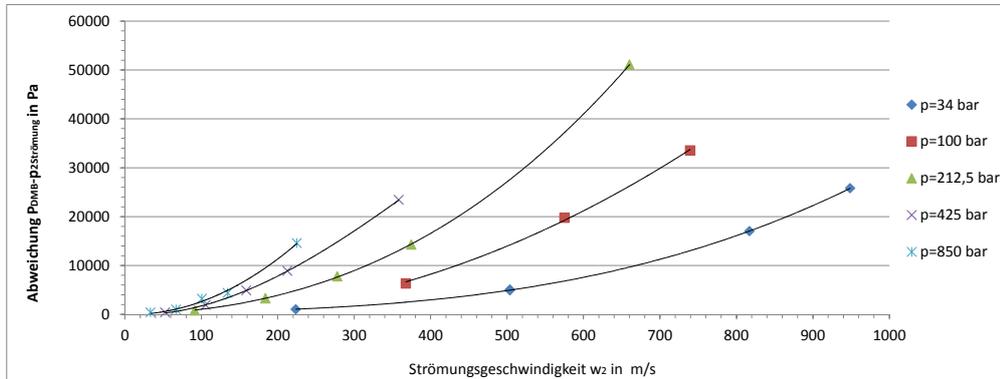
Aus den Quellen geht hervor, dass die Länge der DMB ebenfalls einen Einflussfaktor auf den Druckfehler hat. Bei steigender Bohrungslänge bis zu einem Verhältnis von  $L_{DMB}/d_{DMB} \approx 3,5$  steigt der Messfehler, danach bleibt er konstant [3]. Um eine Beschädigung der DMB durch Bearbeitungsverfahren und hohe Drücke zu verhindern, wird die Länge größer als dieses Verhältnis dimensioniert ( $L_{DMB}=2,5$  mm). Die DMB mündet in einer Bohrung, die dem Innendurchmesser des Anschlussrohres entspricht.

### 3.7.5 Korrektur des Fehlereinflusses durch die Druckmessbohrung

Die beschriebenen Effekte in der Druckmessbohrung verursachen einen systematischen Fehler, welcher in der Messsoftware kompensiert werden soll. Dabei können die Daten aus der Literatur nicht direkt angewendet werden. Die von R. Shaw, B. J. McKeon & A. J. Smits durchgeführten Messungen wurden mit Rohrleitungen durchgeführt, welche ein Vielfaches größer sind als die Messdüse. Deshalb weisen sie größere  $d_{Rohr}/d_{DMB}$ -Verhältnisse auf, wodurch die Ergebnisse nicht übertragbar sind.

Aus diesem Grund soll der Messfehler der vorliegenden Messdüse durch eine CFD-Simulation errechnet werden. Damit die Qualität der Simulation eingeschätzt werden kann, wird zunächst ein Modell der Versuche von und B. J. McKeon & A J Smits aufgebaut und deren Ergebnisse mit der Simulation verglichen. Die relative Abweichung des Druckfehlers zum Versuchsmesswert der Quelle liegt bei 4%. Die daraus gezogenen Erkenntnisse zur Modellierung in Bezug auf Netzgröße und Gestaltung werden auf die Messdüse übertragen.

Bei den CFD- Simulation der Düsendruckmessbohrungen wird der Betriebsbereich nach Abb. 25: simuliert. Dabei ändert sich die Druckabweichung mit steigender Gasdichte.



**Abb. 37: Simulationsergebnisse zur Korrektur des DMB-Fehlers ( $l_{DMB}=2,5$  mm;  $d_{DMB}=0,3$  mm)**

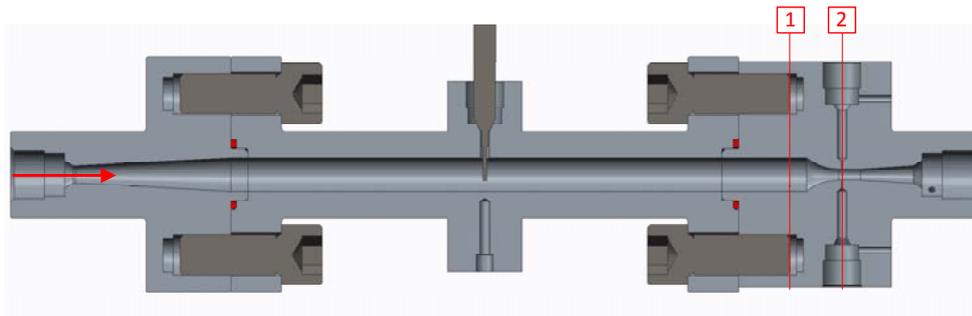
Aus 0 geht das Ergebnis der Simulationen hervor. Es zeigt sich, dass der Druckfehler bei höheren Drücken schneller steigt. Die Simulationsdaten werden in das Messprogramm implementiert, um den korrigierten Druck in der Strömung zu berechnen. Dabei gilt:

$$p_2 = p_{2\text{ DMB}} - \Delta p_{\text{DMB}}$$

**Formel 8**

### 3.8 Konstruktion der Messdüse

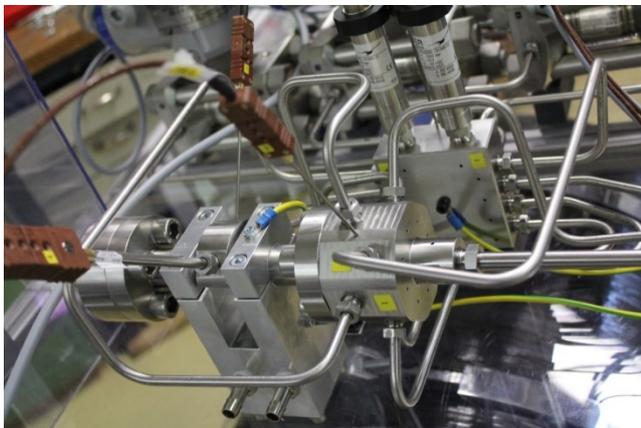
Basierend auf den vorangegangenen Untersuchungen kann die Geometrie der Düse definiert werden. In der Druckgeräterichtlinie [6] wird als Prüfdruck der 1,43 fache Wert des zulässigen Höchstdrucks (875 bar) definiert. Die Messdüse muss deshalb auf einen Druck von  $p_{\text{ausl}} = 1250$  bar ausgelegt werden.



**Abb. 38: Konstruktion der Messdüse mit eingezeichneten Messebenen**

Abb. 38: zeigt die Konstruktion der Messdüse. Am Eingang und Ausgang befinden sich zum Anschluss an die Rohrleitungen (Durchmesser 3/8") konisch dichtende Hochdruckverschraubungen. Dieser mündet vom Einlass aus in einen 6° Diffusor, der den statischen Druck  $p_1$  bei strömendem Fluid erhöht und die Strömungsgeschwindigkeit senkt. Dadurch wird der Differenzdruck erhöht und die mechanische Belastung des Thermoelements gesenkt. Der Diffusor mündet in die Beruhigungsstrecke mit dem Düseneinlaufdurchmesser  $d_1=10$  mm. Die Länge der Beruhigungsstrecke beträgt  $18 \times d_1$ .

In der Mitte der Beruhigungsstrecke wird ein Thermoelement montiert, welches die Gastemperatur vor der Düse misst. Das Thermoelement besitzt eine zylindrische Messspitze mit dem Durchmesser 1mm. Es konnte im Rahmen einer Recherche kein Thermoelement mit kleinerem Durchmesser am Markt gefunden werden, welches Drücken von bis zu 875 bar in einer Wasserstoff-Atmosphäre standhält. Die Messdüse ist aus Fertigungsgründen dreigeteilt. Die Bauteile sind geflanscht, wobei die Positionierung der Kanalabschnitte zueinander relevant ist, um eine Störung der Strömung am Flanschübergang zu vermeiden. Die Abdichtung zwischen den drei Bauteilen erfolgt mit versilberten, metallischen C-Ring Dichtungen. Im rechts dargestellten Bauteil, befindet sich die eigentliche Messdüse, positioniert zwischen den Druckmesebenen. Jede Druckentnahmeebene besitzt vier Druckentnahmebohrungen, sodass eine Zusammenführung eine physikalische Mittelung gewährleistet, die die Einflüsse fertigungstechnischer Abweichungen reduzieren. Ebenfalls wird dadurch einer möglichen Unregelmäßigkeit des Strömungsprofils Rechnung getragen. Nach dem Taillenteil der Düse folgt ein weiterer 6° Diffusor, der im Innendurchmesser des 3/8" Rohrs mündet.



**Abb. 39: Messdüse mit montierten Leitungen und Sensoren**

Abb. 39: zeigt die Messdüsenbaugruppe mit den jeweils vier Messdruckentnahmestellen. Die vier Anschlüsse münden in einem Verteilblock, in dem die Einzeldrücke physikalisch gemittelt und an den die Drucksensoren angeschlossen werden.

Die Messdüse wurde einem hydraulischen Drucktest unterzogen. Dabei wurde mit Wasser ein Prüfdruck von 1250 bar aufgebaut und über 15 min gehalten. Es konnten keine Leckagen gefunden werden und es trat kein Druckverlust auf.

### **3.8.1 Druckmesstechnik**

Aus der Tankstellensimulation nach Kap. 3.3 sind die im Betriebsfeld der SAE J2601 minimal und maximal auftretenden Volumenströme bekannt. Mit Hilfe von Strömungssimulationen mit Ansys Fluent wurden die auftretenden Differenzdrücke bei der gegebenen Düsengeometrie berechnet. Die Differenzdrücke schwanken zwischen 0,06 bar (kleinster Volumenstrom) und 18,8 bar (größter Volumenstrom). Alle verwendeten Drucksensoren müssen statischen Drücke von bis zu 875 bar standhalten.

Um die auftretenden Drücke im Betriebsfeld der SAE J2601 ausreichend genau erfassen zu können, werden in dem des Messgeräts zwei Relativdrucksensoren und drei Differenzdrucksensoren eingesetzt. Der Druck  $p_1$  wird direkt über den Relativdrucksensor gemessen. Die Druckmessung von  $p_2=p_1-\Delta p$  wird mittels Relativdruck- und Differenzdruckmessung vorgenommen. Dabei wird die Differenzdruckmessung aufgrund der Sensorgenauigkeit in mehrere Bereiche eingeteilt (vgl. 0). Hierfür sind die Differenzdrucksensoren parallel geschaltet.

Differenzdruckbereich $\Delta p$	Sensor	Genauigkeit
>5000 mbar	Relativdrucksensoren mit Messbereich: 0-1000 bar	0,006% FS (bez. auf 1000 bar)
1300 mbar – 5000 mbar	Differenzdrucksensor mit Messbereich: 0-5000 mbar	0,2 % FS (bez. auf 5000 mbar)
130 mbar – 1300 mbar	Differenzdrucksensor mit Messbereich: 0-1300 mbar	0,23 % FS (bez. auf 1300 mbar)
60 mbar – 130 mbar	Differenzdrucksensor mit Messbereich: 0-130 mbar	1,15% FS (bez. auf 130 mbar)

Entwicklung Mengenummessung  
HRS,  
Arbeiten der Hochschule  
Offenburg

**Abb. 40: Aufteilung des Differenzdruckbereichs auf verschiedene Sensoren**

Die Relativdrucksensoren besitzen einen eigenen Messumformer und werden mit digital über RS485 ausgelesen. Die Differenzdrucksensoren werden analog über ein 4-20 mA Messsignal ausgelesen. Die Sensoren sind Wasserstoffbeständig und besitzen eine Zulassung nach ATEX.

### 3.8.2 Temperaturmesstechnik

Die Temperaturmessung des Gases an erfolgt mit einem Thermoelement vom Typ T (Wika, Modell TC 90). Der Sensor ist zugelassen für Wasserstoff bei Drücken von bis zu 900 bar und besitzt eine zulässige Messabweichung nach Klasse 1 ( $\pm 0,5$  K). Aufgrund der hohen Temperaturgradienten während der Betankung ist die Ansprechzeit von entscheidender Rolle. Durch einen Messspitzendurchmesser von 1 mm kann eine Zeitkonstante von  $T_{90}=0,4$  s erreicht werden.



**Abb. 41: Thermoelement Wika TC-90 zur Messung der Gastemperatur**

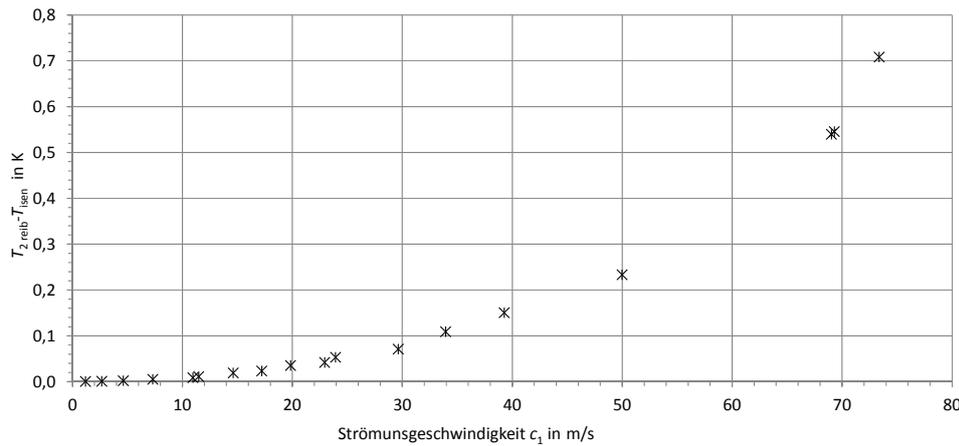
Aufgrund des Taillendurchmessers von 3,3 mm kann die Temperatur in diesem Querschnitt nicht mit einem Thermoelement erfasst werden. Eine Messspitze mit einem Durchmesser von 1 mm würde die Strömung stark beeinflussen. Über die Temperaturmessung des Gases vor der Düse sowie die Druckmessungen in beiden Ebenen kann die isentrope Temperatur im Tailenquerschnitt berechnet werden. Etwaige Einflüsse von Reibung oder Wärmeübergang zwischen den beiden Messebenen können anschließend kompensiert werden.

### 3.8.3 Reibungseinfluss auf Temperatur

Die Reibung in der Düse hat zur Folge, dass ein Teil der kinetischen Energie dissipiert wird: der Druck in hinter der Düse sinkt, während die Temperatur gegenüber einer isentropen Zustandsänderung steigt. Demnach gilt:

$$T_{2\text{ reib}} > T_{2\text{ isen}}$$

Um die Temperaturdifferenz zu ermitteln, werden im gesamten Betriebsbereich CFD-Simulationen der Düse durchgeführt.



**Abb. 42: Temperaturabweichung an Messebene 2 durch Reibung**

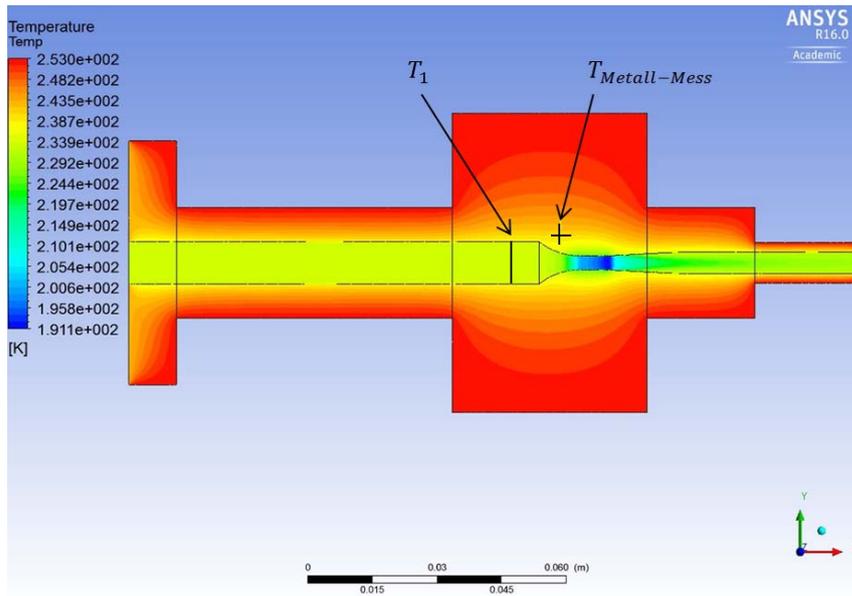
Die Ergebnisse der Simulation sind in 0 dargestellt: Die Temperaturerhöhung aufgrund von Reibung ist abhängig von der Strömungsgeschwindigkeit und kann mit einem Polynom 2. Ordnung beschrieben werden.

### 3.8.4 Einfluss auf Temperatur $T_2$ durch Wärmeübergang

Um zusätzlich den Wärmeübergang zwischen den Druckmessebenen zu berücksichtigen, wird ein weiteres Thermoelement in die Düse eingebracht, welches die Metalltemperatur 3 mm oberhalb des Strömungskanals misst. Mit der Temperaturdifferenz lässt sich nach Gl. Formel 9 der Wärmestrom berechnen.

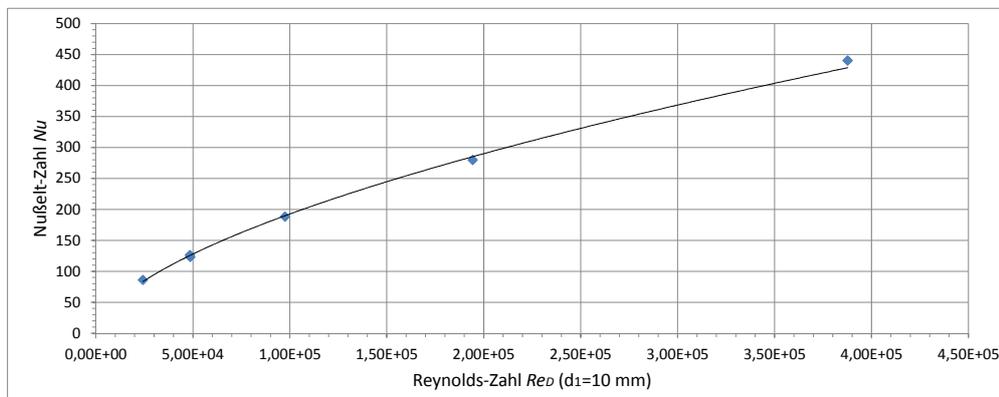
$$\dot{Q}_{12} = (T_{\text{Mess-Metall}} - T_1) \cdot \alpha \cdot A_{\text{Wand}} \quad \text{Formel 9}$$

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{d_1} \quad \text{Formel 10}$$



**Abb. 43: Simulation zur Berechnung des Wärmeübergangs mit Ansys CFX**

Um den Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha$  Formel 10) abzubilden, werden CFD-Simulationen wie in 0 durchgeführt, bei denen der Wärmestrom bei veränderlichen Strömungsbedingungen berechnet wird. Damit kann auf die Nußelt-Zahl  $Nu$  geschlossen werden.



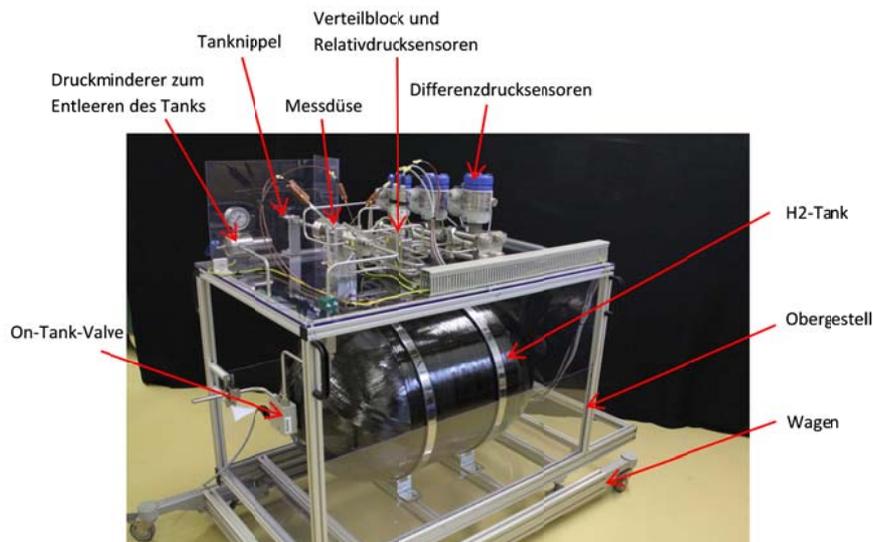
**Abb. 44: Nußelt-Korrelation für den Wärmeübergang in der Düse**

Da die Reynoldszahl  $Re_D$  und die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  aus der adiabaten Berechnung bekannt sind, kann über die Nußelt-Zahl  $Nu$  der Wärmestrom  $\dot{Q}$  berechnet werden, sodass alle Informationen über den Bilanzraum des ersten Hauptsatzes vorliegen. Dadurch soll er erneut mit den gewonnenen Informationen durch die Korrekturen berechnet werden können.

### 3.9

## Aufbau des gravimetrischen Teststands (Referenzmesssystem)

Um die entwickelte Durchflussmessgerät untersuchen und bewerten zu können, wird ein gravimetrischer Teststand aufgebaut. Durch eine Wägung vor und nach der Betankung lässt sich die Differenzmasse bestimmen, welche mit dem integrierten Massenstromverlauf des Messgeräts verglichen wird.



**Abb. 45: Teststand mit eingebauten Komponenten**

Um das Messgerät mit realitätsnahen Volumen- und Massenströmen zu untersuchen, wird das Gas im Teststand in einen für Wasserstoff zugelassenen Fahrzeugtank gefüllt. Der Tank besitzt ein Volumen von 103 L, was einem üblichen Wasserstoff-PKW entspricht.

Abb. 45: zeigt den aufgebauten Teststand. Der Tanknippel ist konform zu SAE J2600 / SAE J2799 und kann an jede Wasserstofftankstelle in Deutschland angeschlossen werden. Die Messdüse befindet sich direkt hinter dem Tanknippel, um das unberücksichtigte Volumen möglichst gering zu halten. Von der Messdüse strömt der Wasserstoff über ein T-Stück und das On-Tank-Valve in den Tank. Zum Entleeren ist an dem T-Stück weiterhin ein Druckminderer angeschlossen. Das On-Tank-Valve besitzt ein Magnetventil, womit der Tank vom Leitungssystem abgesperrt wird. Dieses muss zum Entleeren geöffnet werden. Außerdem beinhaltet es einen Temperatursensor, mit dem die Gastemperatur im Tank gemessen wird sowie ein Überdruckventil.

Als Wägeeinrichtung wird ein Massekomparator vom Typ CCI100K2 von Sartorius mit einem Wiegebereich von 180 kg eingesetzt. Das Obergestell des Teststandes ist auf die Breite des Messekomparators ausgelegt. Der Wagen besitzt eine Hubeinrichtung, mit dem das Obergestell auf dem Komparator abgesetzt werden kann. Zur Wägung kann dieser vom Obergestell abgekoppelt werden, sodass seine Masse für die Messung irrelevant ist. Das Obergestell besitzt inkl. aller Komponenten eine Leermasse von 170 kg.

### 3.9.1

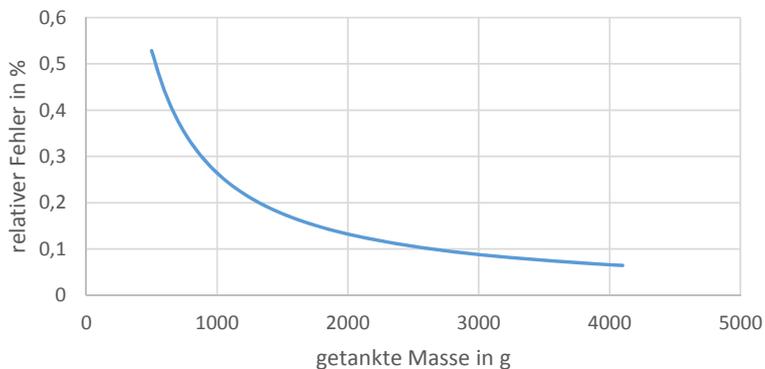
#### Genauigkeit der Referenzmessung

Die empirische Standardabweichung des gravimetrischen Teststands wurde nach DIN V ENV 13005 (GUM, Typ A) ermittelt und beträgt  $\sigma = 0,66$  g. Mit einem Faktor von  $k=2$  ergibt sich eine erweiterte Unsicherheit von  $\pm 1,32$  g pro Messung. Diese Messunsicherheit bei der Wägung vor und nach der Betankung auftreten kann ergibt sich ein relativer Messfehler des Teststands nach Gl. Formel 11 (Formel 11).

$$\frac{2 \cdot 1,32 \text{ g}}{\text{getankte Masse in g}} \cdot 100 \%$$

**Formel 11**

Der daraus resultierende relative Fehler in Abhängigkeit der getankten Masse kann entnommen werden.



**Abb. 46: Relativer Messfehler des gravimetrischen Teststands in Abhängigkeit der getankten Masse**

Die Ermittlung der empirischen Standardabweichung wurde, wie alle Wägungen selbst, in einer Halle aufgenommen. Der Einfluss von Wind kann somit ausgeschlossen werden. Die gravimetrische Messung ist zu einem geringen Maße dem Einfluss der Auftriebskraft ausgesetzt. Dabei ändert sich die Dichte aufgrund einer Temperatur oder Druckänderung in der Halle in diesem kurzen Zeitraum (10 min) kaum, sodass dieser Einfluss bei einer Referenzmessung vernachlässigbar ist. Auch die Volumenänderung des Tanks aufgrund des hohen Innendrucks von bis zu 875 bar führt in Maximalfall zu einem veränderten Auftrieb von 0,3 g und kann deshalb vernachlässigt werden.

### 3.10 Betankungsversuche

Zur Untersuchung des Durchflussmessgeräts wurde der gravimetrische Teststand an der Tankstelle des Fraunhofer ISE mehrfach betankt. Um den gesamten Betriebsbereich nach SAE J2601 abzudecken wurden neben Vollbetankungen auch Teilbetankungen mit unterschiedlichen Start- und Enddrücken durchführt.

Betankung		Referenzmessung	Rel. Abweichungen der Messdüse zur Referenzmessung		
Startdruck [bar]	Enddruck [bar]	Massedifferenz Komparator [g]	Rel. Abw. alle Sensoren [%]	Rel. Abw. (Relativdruck- und ein Differenzdrucksensor) [%]	Rel. Abw. (nur Relativdrucksensoren) [%]
315	445	571	2,17	0,46	0,00
510	734	591	1,91	-1,39	3,27
50	177	660	-0,77	-1,29	-1,95
46	200	963	-1,50	-1,38	-0,80
184	401	1101	1,44	0,28	0,37
400	695	1120	1,21	-0,52	1,07
433	732	1122	1,61	0,18	-1,13
375	690	1264	0,49	-0,69	-0,93
357	713	1399	0,83	-0,24	-0,52
125	390	1416	0,92	0,09	0,54
320	690	1507	0,13	-0,63	-0,86
69,5	680	3032	0,80	0,16	0,25

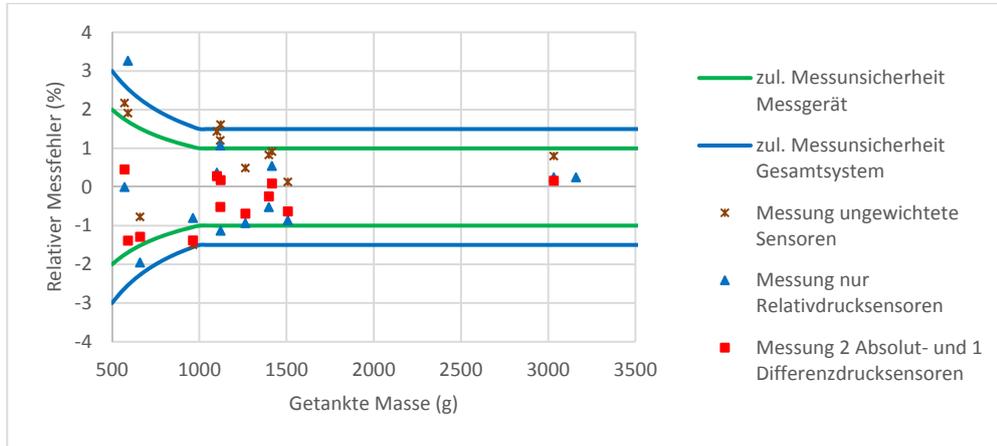
**Abb. 47: Messabweichungen der Venturidüse im Vergleich zum Referenzmesssystem**

Abb. 47: zeigt die Messergebnisse des Durchflussmessgeräts und die relative Messabweichung zum Referenzmesssystem. Dabei werden nur die isentropen Massenströme ausgewertet. Die Berechnungsmodelle für die Temperatureinflüsse von Reibung und Wärmeübergang, welche Kap. 3.8 beschrieben werden, führen zu größeren Messfehlern im Vergleich zu einer isentropen Berechnung. Aufgrund der hohen Komplexität der Strömungssimulationen, welche den Berechnungsmodellen zugrunde liegen, konnte deren Richtigkeit nicht im Vorfeld validiert werden.

Von Interesse bei der Auswertung ist der Einfluss der verschiedenen Drucksensoren auf die Qualität des Messergebnisses. Beide Messebenen sind mit einem Relativdrucksensor ausgestattet, parallel dazu sind 3 Differenzdrucksensoren mit verschiedenen Druckmessbereichen geschaltet (vgl. 0).

Wie zu erwarten, sind die relativen Messfehler des Durchflussmessgeräts geringer, wenn die Differenzdruckmessgeräte berücksichtigt werden gegenüber dem Fall, dass nur die Relativdruckmessgeräte ausgewertet werden. Es zeigt sich jedoch in einzelnen Betriebspunkten, dass mit den Relativdrucksensoren alleine trotz deren größerer Messunsicherheit bessere Ergebnisse erzielt werden können. Dies konnte auf die

höhere Ansprechzeit der Differenzdrucksensoren zurückgeführt werden. Bei sehr starken Druckgradienten während der Betankung ist der Einfluss der Trägheit größer als der Einfluss der Messunsicherheit der Drucksensoren.



**Abb. 48: Messergebnisse im Vergleich zu RMS mit verschiedener Auswahl an Drucksensoren**

In Abb. 48: dargestellt werden die relativen Messfehler in Abhängigkeit der getankten Masse (siehe Tab. 6) sowie die zulässigen Fehlergrenzen nach OIML R139. Als Dreiecke dargestellt sind die Messergebnisse basierend auf den Absolutdrucksensoren. Hier liegt einer von 12 Messwerten außerhalb des zulässigen Bereichs für das Gesamtsystem. Unter Berücksichtigung von allen Sensoren (2 Absolut- und 3 Differenzdrucksensoren) liegt ebenfalls einer von 12 Messwerten außerhalb des zulässigen Bereichs. Weil der Einfluss der Sensorträgheit bei den Differenzdrucksensoren insbesondere bei hohen Druckgradienten zu Abweichungen führt, wird in der optimierten Auswertung (dargestellt als Rechtecke) nur ein Differenzmessgerät für geringe Differenzdrücke (< 1 bar) verwendet. Hier liegen alle Messwerte im zulässigen Bereich für das Gesamtsystem. Außerdem liegen 11 von 12 Messwerten auch innerhalb der engeren 1 % Toleranzgrenze für das Messgerät.

### 3.11 Diskussion und Ausblick

Im Rahmen des Forschungsvorhabens konnte ein Funktionsmuster eines Durchflussmessgeräts für Wasserstofftankstellen sowie ein gravimetrischer Referenzteststand entwickelt werden. Mit Hilfe des gravimetrischen Teststands können Fahrzeugbetankungen in der 700 bar Druckklasse durchgeführt werden, wobei die getankte Masse auf bis zu 0,1 % genau gemessen werden kann. Der Teststand ist mit einer SAE-konformen Füllkupplung ausgestattet und kann an jeder Wasserstofftankstelle eingesetzt werden.

Das entwickelte Durchflussmessgerät konnte in Feldversuchen an der Wasserstofftankstelle des Fraunhofer ISE getestet werden. Es konnte gezeigt werden, dass die Durchflussmessung funktioniert und eine sehr gute Messgenauigkeit erreichen kann. Die Messdüse ist in der Lage, die stark schwankenden Volumenströme während der Betankung sowie die Druckstöße zur Dichtheitsprüfung zu erfassen. Von insgesamt 13 verwertbaren Betankungen liegen 12 Messungen innerhalb der geforderten 1% Grenze für das Messgerät (nach OIML R139). Die einzelne Messung, welche außerhalb der 1% Grenze liegt, weist einen relativen Fehler von unter 1,5 % auf und liegt damit noch immer im zulässigen Toleranzfeld für das Gesamtsystem (siehe Abb. 48:).

Es konnte gezeigt werden, dass das Differenzdruckverfahren für die Durchflussmessung an Wasserstofftankstellen grundsätzlich geeignet ist und das Funktionsmuster als Basis für ein eichfähiges Messgerät dienen kann.

Die Temperatur in der Düsentaille kann aufgrund des geringen Durchmessers nicht direkt gemessen werden und wird rechnerisch ermittelt. In den Feldversuchen konnte gezeigt werden, dass eine isentrope Berechnung der Temperatur ausreichend genaue Ergebnisse liefert. Die Berechnungsmodelle für Reibung und Wärmeübergang in der Düse, welche auf numerischen Simulationen basieren, führten bei den Versuchen zu größeren Messfehlern und scheinen fehlerbehaftet. Aufgrund der Komplexität konnte die Qualität der Simulationen (für Reibung und Wärmeübergang) erst in den Feldversuchen untersucht werden. Da die Messfehler bei einer isentropen Berechnung der Temperatur in einem sehr guten Bereich liegen, besteht an dieser Stelle kein direkter Handlungsbedarf.

In Bezug auf das entwickelte Funktionsmuster können durch Optimierungsmaßnahmen Verbesserungen in der Messgenauigkeit erzielt werden. So kann durch eine Verkürzung der Messleitungen und das Entfallen des Druckverteilkblocks Leitungsvolumen reduziert werden, wodurch die Ansprechzeit der Drucksensoren verbessert werden kann. Die am Funktionsmuster eingesetzte Labor-Hardware zur Messdatenerfassung erreicht eine Abtastrate von ca. 3 Hz und ermöglicht nicht das gleichzeitige Auslesen mehrerer Sensoren. Durch die Entwicklung einer Echtzeit-Auswerteelektronik (Sample and Hold) mit höherer Abtastrate können insbesondere bei hohen Druckgradienten (bspw. bei Druckstößen) Verbesserungen erzielt werden.

# 4

## Entwicklung eichfähige Wasserstoffmessung, Arbeiten der Sick AG

**Autor:** T. Stocker, Dr. J. Zähr, M. Haas (Sick AG)

### 4.1

#### Grundlagenermittlung zur Entwicklung einer eichfähigen Wasserstoffmengenmessung basierend auf Ultraschalltechnik (AP 5)

##### 4.1.1 Zielstellung

Die Gasmengenmessung war Bestandteil von zwei Arbeitspaketen:

Arbeitspaket 2

- Erprobung der Ultraschalldurchflussmesstechnik auf deren grundlegende Eignung für den Einsatz in Wasserstoffanwendungen mit geringen und schwankenden Durchflüssen bei unterschiedlichen Drücken

Arbeitspaket 5

- Ursprüngliches Ziel:
  - Im laufenden Projekt wird eine Eichfähigkeit angestrebt
- Anpassung des Ziels (siehe Verlängerungsschreiben März 2016)
  - Versuche zur Grundlagenermittlung bei PTB
  - Weitere Bewertung der Eichfähigkeit auf Basis der laufenden Versuchsdaten

Es wurde vereinbart, dass ein Zähler für den Elektrolyseteststand am Fraunhofer ISE verwendet werden soll. Die Versuchsrandbedingungen für diesen Versuchsstand waren:

- 200 kW-Teststand mit anschließender Ableitung des Wasserstoffs zur Fackel
- Messung von feuchtem, O<sub>2</sub>-haltigen Wasserstoff (bis zu 6,25 % O<sub>2</sub>)
- Mit Hilfe einer Heizung wird die Gastemperatur über dem Taupunkt gehalten, so dass eine Nebel- oder Tröpfchenbildung unterbunden wird.
- Auslegung der Rohrleitung: DN25, PN63
- Volumenstrombereich: 0...50 Nm<sup>3</sup>/h @1,2 bar, abs

## 4.1.2

### Messaufgabe – Herausforderung Ultraschallmengenmessung für Gasmengenmessung

Entwicklung eichfähige  
Wasserstoffmessung,  
Arbeiten der Sick AG

#### 4.1.2.1

##### Laufzeitdifferenzmessung

Die von der Sick AG angebotene Gasmengenmessung beruht auf der Ultraschall- Laufzeitdifferenzmethode. Zwei schräg zur Strömung angeordnete, gegenüberliegende Ultraschallsensoren dienen als Sender und Empfänger von Ultraschallsignalen, vgl. Abb. 49:

. Aufgrund der Addition der Schallgeschwindigkeit und Strömungsgeschwindigkeit des Gases ergibt sich in Richtung der Strömung (Sender B → Empfänger A) eine geringere Laufzeit als bei der Ultraschallaussendung entgegen der Strömung (Sender A → Empfänger B). Dieser Laufzeitunterschied ist ein Maß für die Strömungsgeschwindigkeit des Mediums (vgl. Formel 12 und kann mithilfe des Durchmessers in den Volumenstrom umgerechnet werden.

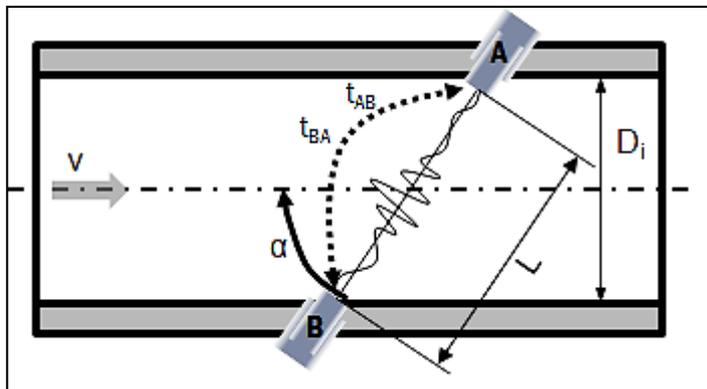


Abb. 49: Prinzip der Laufzeitdifferenzmessung

$$v = \frac{L}{2 \cdot \cos \alpha} \left( \frac{1}{t_{AB}} - \frac{1}{t_{BA}} \right)$$

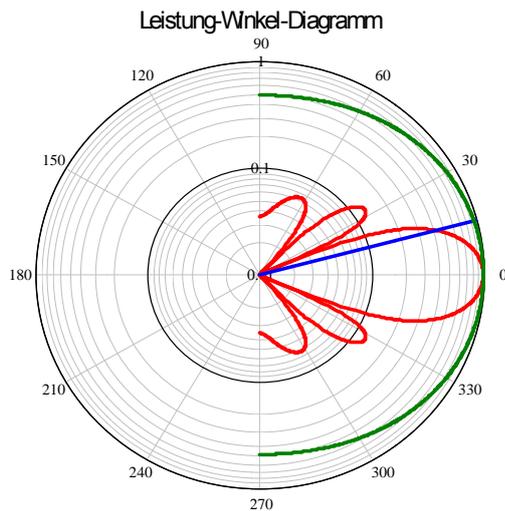
Formel 12

## 4.2

### Herausforderung Volumenstrommessung an Wasserstoff

Wasserstoff hat im Vergleich zu Erdgas eine ca. dreifache Schallgeschwindigkeit (Methan: ca. 400 m/s, Wasserstoff: ca. 1270 m/s). Aufgrund der erhöhten Schallgeschwindigkeit ergibt sich ein fast kugelstrahlerförmige Schallwellenausbreitung, siehe Abb. 50:, welche zu einer verstärkten Reflexionsproblematik führt.

-----  
Entwicklung eichfähige  
Wasserstoffmessung,  
Arbeiten der Sick AG  
-----



Grün: H2

Rot: Methan

**Abb. 50: Schallausbreitung in Abhängigkeit von Schallgeschwindigkeit des Mediums**

Neben dem Effekt der Schallausbreitung wird die Fehlergrenze insbesondere bei der Laufzeitdifferenzmessung beeinflusst. Zur näherungsweisen, vereinfachten Betrachtung wird folgende Gleichung genutzt:

$$\frac{\Delta v}{v} = \frac{c^2}{2 \cdot L \cdot \cos(\alpha) \cdot v} \cdot \Delta \Delta t$$

**Formel 13**

$$\Delta \Delta t_{\max} = F_{\text{Zul}} \cdot \frac{2 \cdot L \cdot \cos(\alpha) \cdot v}{c^2}$$

**Formel 14**

Entsprechend Formel 14 geht die Schallgeschwindigkeit (SOS) in die Fehlerberechnung für die Laufzeitdifferenz quadratisch ein. Aufgrund der ca. dreifachen SOS bei Wasserstoff- im Vergleich zu Erdgasanwendungen steigt somit der Fehler signifikant. Vor allem bei geringen Volumenstromgeschwindigkeiten sind hohe Messfehler zu erwarten.

## 4.2.1 Eignung konventioneller Ultraschallzähler für Messaufgabe

### 4.2.1.1 1"-Zähler

Ursprünglich wurde ein 1"-Zähler aufgrund der im Vergleich zum 2"-Zähler höheren Strömungsgeschwindigkeiten ausgewählt. Bei diesem wurde der Pfadwinkel auf 45 ° festgesetzt. Dies stellt ein Kompromiss zwischen einer möglichst großen Pfadlänge und dem Hereinragen der Ultraschallwandler dar, die zu einer Strömungsbeeinflussung führen. Bei dem Zähler wurde sowohl ein Reflexions- als auch zwei Direktpfade vorgesehen, vgl. Abb. 51: Die Berücksichtigung eines Reflexionspfads resultiert aus der Idee der Messpfadverlängerung.

Als kritisch wird jedoch die höhere Reflexionsneigung angesehen, welche zu einer Störung des Nutzsignals führen kann.



**Abb. 51: Konstruktive Ausführung des ursprünglich geplanten 1"-Zählers mit Reflexions- und Direktpfadlayout**

#### Vorversuche in Luft

Vorversuche in Luft zeigten, dass nur mit dem Direktpfad auswertbare Signale erhalten werden können. Hinsichtlich der Sondenfrequenz wurden 200 kHz und 300 kHz-Sonden getestet. Hier zeigte sich, dass die bessere Zeitauflösung der 300 kHz-Sonden zu einer verbesserten Messperformance führt.

#### Strömungsversuche bei der PTB

Die Versuche bei der Physikalisch Technischen Bundesanstalt in Braunschweig liefen nach folgendem Ablauf ab:

1. Strömung mit reinem Stickstoff
2. Langsame Steigerung des Anteils von Wasserstoff → langsamer Anstieg der Schallgeschwindigkeit des Gases

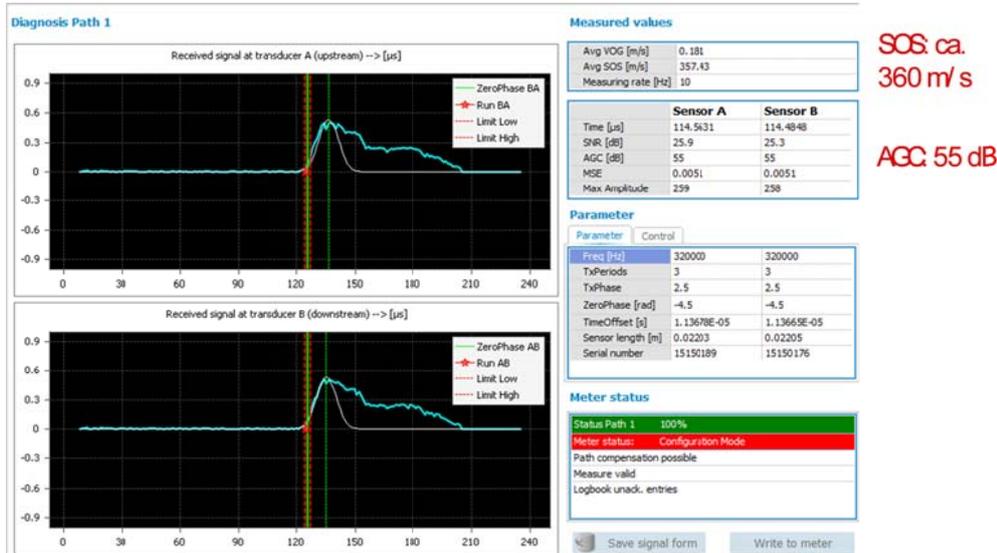
Die Strömungsversuche konnten unter folgenden Randbedingungen durchgeführt werden:

- $Q = 0,01 \text{ m}^3/\text{h} \dots 10 \text{ m}^3/\text{h}$
- $p = 1,5 \text{ bar bis } 3,2 \text{ bar}$

Signalqualität bei SOS=360 m/s

In Abb. 52: sind die Empfangssignale in und entgegen der Strömungsgeschwindigkeit bei einer Schallgeschwindigkeit von ca. 360 m/s dargestellt. Die dargestellte Signalform entspricht einem Standardsignal, auf dessen Basis die Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit nach der Laufzeitdifferenzmethode gut durchgeführt werden kann. Bei einem solchen Standardsignal ist eine Signalverstärkung (AGC) von 55 dB ausreichend.

Entwicklung eichfähige  
Wasserstoffmessung,  
Arbeiten der Sick AG



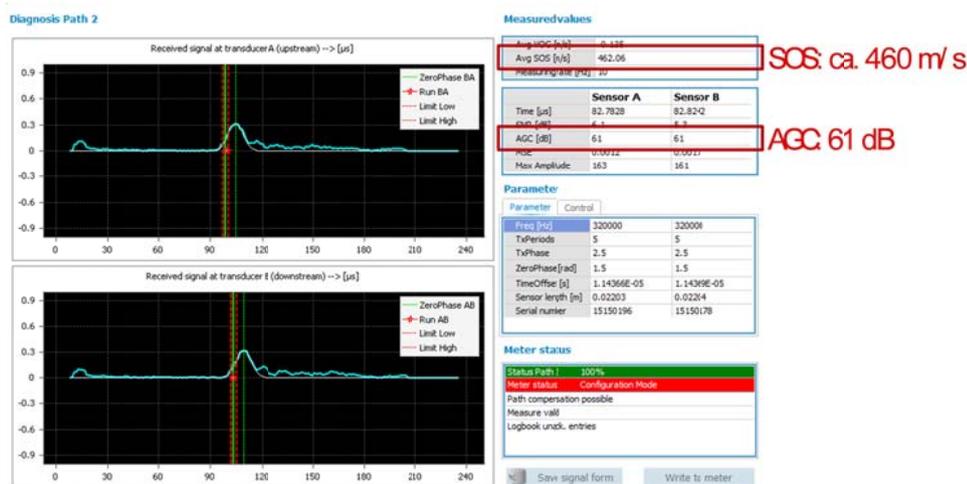
SOS: ca.  
360 m/s

AGC: 55 dB

Abb. 52: Signalqualität bei SOS=360 m/s (Stickstoff = Standardsignal)

Signalqualität bei SOS = 460 m/s

Bei Erhöhung der Schallgeschwindigkeit weitet sich die Abstrahlkeule des Sendewandlers auf. Dies führt zu einer Verringerung der Empfangssignalstärke, so dass der Empfangsverstärker empfindlicher eingestellt werden muss. Dies wird durch eine Erhöhung der AGC (Average Gain Control, AGC = 61 dB) realisiert. Dies führt zu einem erhöhten Übersprechen des Sendesignals in den Empfangskanal, so dass das Signal bei Laufzeit Null verstärkt wird, vgl. Abb. 53:.



SOS: ca. 460 m/s

AGC: 61 dB

Abb. 53: Signalqualität bei SOS = 460 m/s (SOS ↑ → AGC ↑)

Signalqualität bei SOS = 690 m/s

Bei einer weiteren Zumischung von Wasserstoff weitet sich die Schallkeule stark auf, so dass die Empfindlichkeit des Empfangsverstärker weiter erhöht werden muss (AGC = 74 dB). Dies führt zu einem verstärkten Übersprechen des Sendesignals in den Empfangskanal. Des Weiteren beträgt die theoretische Signallaufzeit aufgrund der hohen Schallgeschwindigkeit des Gases nur noch 30 µs.

Bei dieser Signalform ist keine Laufzeitdifferenzbestimmung mehr möglich, vgl. Abb. 54:.

Die Versuche haben gezeigt, dass der 1"-Zähler nicht für Wasserstoffapplikationen geeignet ist.

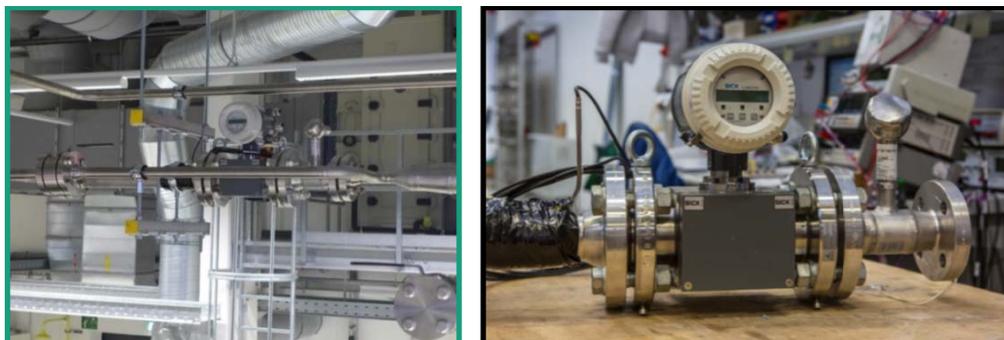
-----  
 Entwicklung eichfähige  
 Wasserstoffmessung,  
 Arbeiten der Sick AG  
 -----



**Abb. 54: Zumischung von H<sub>2</sub>:  
 SOS = 690 m/s → AGC ↑↑,  
 Laufzeitdifferenz**

**4.2.1.2  
 2"-Zähler**

Aufgrund der negativen Versuchsergebnisse mit dem 1"-Zähler wurde entschieden, dass für die Versuchsanlage ein 2"-Gerät mit Direktpfaddesign verwendet wird. Der Zähler ist in nachfolgender Abb. 55: dargestellt. Der Drucksensor ist in der Auslaufstrecke (rechts) und der Temperaturfühler als Auflagethermofühler (aufgrund des geringen Rohrdurchmessers von 1", links in der Einlaufstrecke) ausgeführt. Es musste in Ein- und Auslauf eine Aufweitung bzw. Verringerung von 1" (Rohrdurchmesser Versuchsanlage) auf 2" (Durchmesser Zähler) realisiert werden. Dies bedeutet eine Verringerung der Strömungsgeschwindigkeit.



**Abb. 55: Zähler (#12616) mit  
 Druck- und  
 Temperaturmessung  
 (Auflagethermofühler) in  
 Ein- bzw. Auslauf (links:  
 in Fertigung, rechts:  
 Einbausituation am  
 Fraunhofer ISE)**

In nachfolgender Abb. 56: ist die Kalibrierkurve mit Wasserstoff für den 2"-Zähler bei der PTB dargestellt. Dabei ist zu beachten, dass bei der PTB nur bis zu einem Volumenstrom von 10 m<sup>3</sup>/h getestet werden konnte. Alle darüber hinaus angezeigten Werte sind angenommen auf Basis des Zählerverhaltens in Luft bei höherer

Strömungsgeschwindigkeit in Kombination mit den Wasserstoffversuchen bei niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten.  
 Es ist zu erkennen, dass im as found-Zustand ab 3 m<sup>3</sup>/h ein stabiler Zustand vorhanden ist. Es sollte dennoch der bisher genannte minimale Volumenstrom von 5 m<sup>3</sup>/h im Einsatzfall berücksichtigt werden.

Entwicklung eichfähige Wasserstoffmessung, Arbeiten der Sick AG

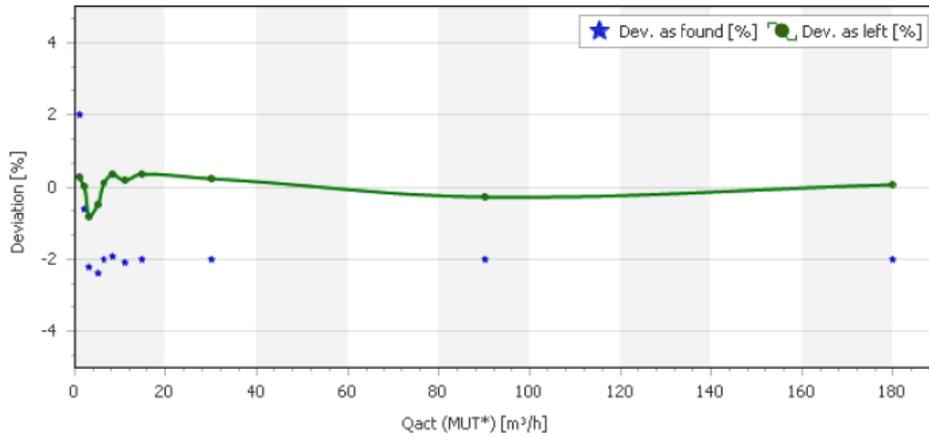


Abb. 56: H<sub>2</sub>-Kalibrierversuche bei PTB

#### 4.2.2 Versuchsaufbau: Längerer Messpfad-Zähler

Die bisher durchgeführten Versuche haben die Grenzen des Standardzählerdesigns für Anwendungen bei Gasen mit hohen Schallgeschwindigkeiten bzw. geringen Volumenströmen aufgezeigt. Für weitere Anwendungen unter diesen Bedingungen ist die Entwicklung eines innovativen Ultraschallzählerdesigns erforderlich. Im Rahmen des Projektes wurde ein erstes Versuchsmuster zur Ultraschalllaufzeitdifferenzmessung unter Nutzung der Schallausbreitung nach dem Prinzip „Ebene Welle“ aufgebaut und getestet. Bei diesem sind die Sonden seitlich angeordnet und die Gasanströmung erfolgt schräg, vgl. Abb. 57: Vorteil dieses Zählerdesigns ist die vollständige Querschnittserfassung durch die Ultraschallwelle zur Bestimmung der Laufzeitdifferenz.

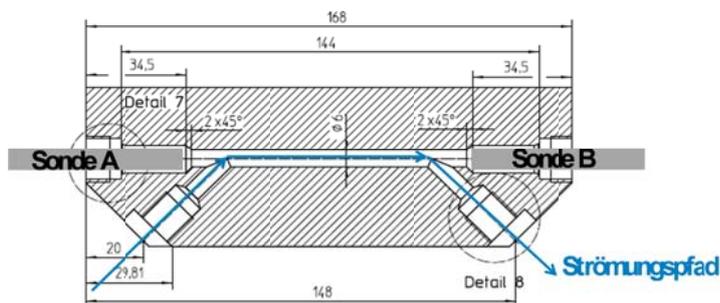
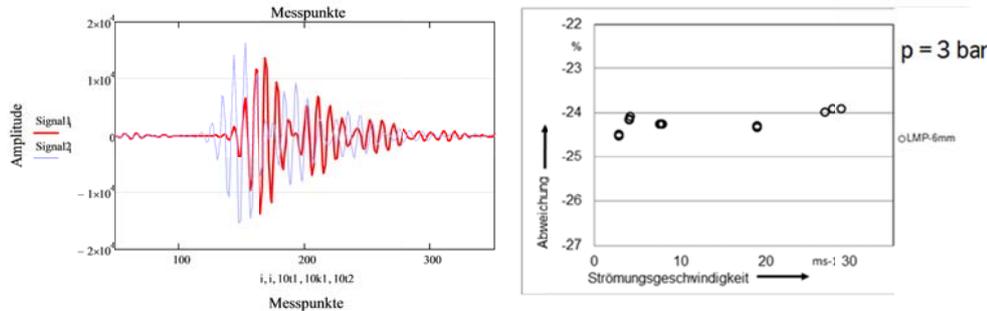


Abb. 57: Längerer Messpfad-Zähler (LMP)

In Abb. 58: ist ein das Empfangssignal sowie die sich ergebende Messunsicherheit dargestellt. Die Signale sind reproduzierbar und mit den vorhandenen Standardauswertemethoden auswertbar. Es zeigte sich eine gleichmäßige Messunsicherheit von ca. -25 % bis zu einer Strömungsgeschwindigkeit von 80 m/s. Numerische Untersuchungen zeigten, dass diese aus den Toträumen vor den Sonden resultiert, d.h. durch eine Kalibrierung kann diese Messunsicherheit heraus gerechnet werden. Diese ersten Strömungsversuche bestätigen die Theorie.

-----  
 Entwicklung eichfähige  
 Wasserstoffmessung,  
 Arbeiten der Sick AG  
 -----



**Abb. 58: H<sub>2</sub>-  
 Strömungsversuche an  
 Versuchsaufbau mit  
 verlängertem Messpfad  
 (links: Signalform, rechts:  
 Messunsicherheit)**

### 4.3

## Grundlagenermittlung zur Reinheitsmessung von Wasserstoff aus der Elektrolyse / Gasreinigung / Verdichtung (AP2)

### 4.3.1

#### Einführung – Ziele aus dem Antrag

Die Sick AG lieferte innerhalb des Projekts die erforderlichen Gaszähler und Gasanalysatoren. Die Grundlagenuntersuchungen dienen dazu die industrielle Eignung der eingesetzten Messtechnik festzustellen sowie Erkenntnisse für eine spätere Weiterentwicklung von eichfähigen Ultraschall- H<sub>2</sub> Gaszählern zu ermitteln. Ferner ist eine Hochdruckkalibrierung des Wasserstoffzählers für eine zukünftige fiskale Abrechnung von Wasserstoff vorgesehen.

Im Rahmen des Projektes sollte eine geeignete Sensorik für die Qualitäts- und Mengenmessung von elektrolytisch erzeugtem Wasserstoff entwickelt werden. Im Hinblick auf die Qualität des erzeugten Wasserstoffs wurden zusammen mit dem ISE die Komponenten Feuchte und Sauerstoff als hauptsächliche Verunreinigungen festgelegt.

Neben der Auswahl und Anpassung der für die geforderten Messbereiche und Prozessbedingungen geeigneten Messtechnik, war die Erarbeitung von Grundlagen zu einer möglichen eichamtlichen Zulassung der Messtechnik eines der Hauptziele.

Die Grundlagenermittlung hat das Ziel in einem möglichen weiteren Projekt einen eichfähigen H<sub>2</sub> Zähler speziell für die Applikation nach PEM für schwankende Durchflüsse bei unterschiedlichen Drücken zu entwickeln.

Es wird von einer, für PEM zu erwartenden hohen Reinheit des erzeugten Wasserstoffs ausgegangen.

Deshalb dient die vorgesehene Gasqualitätsmessung als Prozessmessung zur Überwachung der ordnungsgemäßen Funktion der Elektrolyseanlage und / oder Gasaufbereitung.

Die Qualitätsmessung ist im Projekt zur Absicherung der Gasqualität für die nachfolgenden Verwertungspfade vorgesehen.

Es wird die Leistungsfähigkeit der Elektrolyseanlage in Bezug auf zu definierende Störkomponenten bestimmt. Im Rahmen des Projekt ist geplant, den Gesamtwasserstoff zu messen, sowie die mögliche Hauptstörkomponente O<sub>2</sub>. Möglich ist noch CO<sub>2</sub> und CO. Weitere unbekannte Störkomponenten können nur über die Differenz 100% minus H<sub>2</sub> minus gemessene Verunreinigungen bestimmt werden. Dieser Ansatz soll zeigen, ob die messtechnische Lösung für einen stabilen Betrieb mit Erkennung von Anlagenproblemen (z.B. Membranrissen, Undichtigkeiten der Anlage) geeignet ist.

Entwicklung eichfähige  
Wasserstoffmessung,  
Arbeiten der Sick AG

Der gereinigte Wasserstoff soll in verschiedenen Zwischenspeichern, für unterschiedliche Verwendungszwecke abgefüllt und gelagert werden. Für eine korrekte Abrechnung sind zuverlässige Durchflussmessgeräte notwendig. In dem Verbundvorhaben soll eine auf Ultraschalltechnik basierende Durchflussmessung auf ihre grundlegende Eignung erprobt werden. Die Ergebnisse können dann in einem Folgeprojekt und in Abstimmung mit der Eichdirektion / Physikalisch Technischen Bundesanstalt in ein Konzept zur Geräteweiterentwicklung mit dem Ziel eine Bauart Zulassung und eichamtliche Zulassung zu erhalten einfließen.

Ziel ist es den Nachweis zu erbringen, dass die Qualitäts-/Durchflussmessung für den rauen industriellen Einsatz geeignet ist.

### 4.3.2 Qualitätsmessung

Die Grundlage der möglichen Qualitätsmessung basierte auf der vom ISE vorgegebenen Verfahrenskonzept zum Projektstart (Abb. 59:). Als Aufstellungsort war das Technikum des ISE in der FR- Auerstraße vorgesehen. Im Technikum sollten verschiedene PEM-Elektrolysestacks bei unterschiedlichen Betriebszuständen getestet werden. Nach der Elektrolyse war eine Gasaufbereitung zur Trocknung des Wasserstoffs vorgesehen.

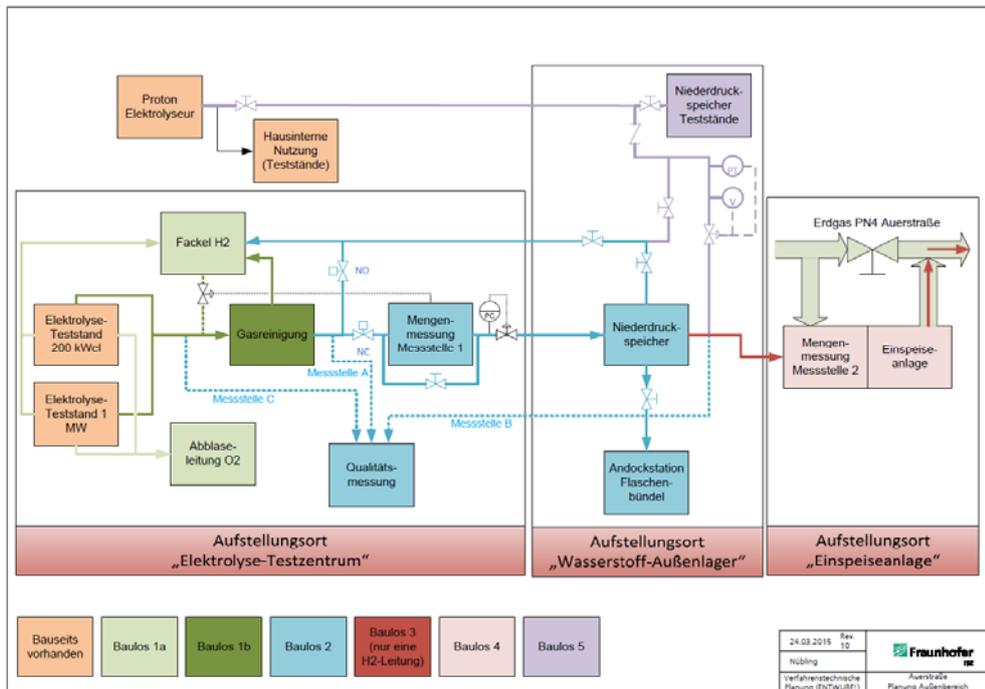


Abb. 59: Verfahrensschemata  
Stand März 2015

Aufgrund der Tatsache, dass unterschiedliche Elektrolyseteststacks, An-/Abfahrbedingungen sowie variierende Betriebszustände getestet werden sollten, war

eine Sauerstoffmessung von 0-21 Vol% sowie eine Sauerstoffmessung von 0-5ppm vorgesehen.

Zur Überwachung von eventuellem Membranbruch in den Elektrolysestacks und zur Überwachung der Gasreinigung und Gastrocknung wurde zudem eine Wassergehaltsmessung vorgesehen.

Weiterhin war die Überprüfung der Gasflaschenbündel geplant. Um kurze Ansprechzeiten der Analysatoren zu gewährleisten, sollte die Entnahme direkt nach dem Elektrolyseur bzw. nach der Gasreinigung erfolgen.

Zur Überwachung der Wasserstoffqualität in den Flaschenbündeln sollte das Gas über eine Messgasleitung zu den Analysatoren geführt werden.

Aufgrund des für den Bau des Teststands notwendigen amtlichen Genehmigungsprozesses und den daraus resultierenden Budget- und Zeitengpässen konnte die PEM –Elektrolyse am ISE Standort, FR- Auerstraße nicht realisiert werden. Um dennoch die Gasanalyse dennoch im laufenden Projekt testen zu können, wurde eine Verlängerung der Projektlaufzeit sowie eine Standortverlegung für die Qualitäts-Messtechnik der zur H<sub>2</sub> Tankstelle des ISE beantragt.

Dadurch wurden aufwendigere Gasentnahmesysteme und die Ausführung des Analyseschrankes zur Aufstellung im Freien notwendig. Die Gasentnahmetechnik incl. der notwendigen Gasaufbereitung wurde an der H<sub>2</sub>-Tankstelle im explosionsgefährdeten Bereich (ZONE 2) installiert (s. Abb. 60:). Zur Erreichung der ATEX Zulassung musste das Messsystem durch ein unabhängiges Prüfinstitut überprüft und zertifiziert werden.

### 4.3.3

#### Eingesetzte Messgeräte

- Sauerstoffmessung im Volumen-Prozent Bereich: Zur Messung der Sauerstoffkonzentration im Volumen-Prozent Bereich wird die paramagnetische Eigenschaft von Sauerstoff genutzt. Innerhalb der Messzelle befindet sich ein Magnetfeld in dem eine diamagnetische Hantel drehbar aufgehängt ist. Eine opto-elektronische Kompensationseinrichtung sorgt dafür, dass die Hantel ständig in der Ruheposition gehalten wird. Die Messzelle wird vom Messgas durchströmt. Das Magnetfeld wird durch die paramagnetische Eigenschaft des Sauerstoffs verändert. Die notwendige Änderung der opto-elektronischen Kompensation ist der Messeffekt, der von der Software ausgewertet wird. Da Anlagenbedingt an der H<sub>2</sub> Tankstelle keine Sauerstoffkonzentrationen im Volumen-Prozent Bereich vorhanden sind, ist dieser Teil der Messung nicht in Betrieb.
- Sauerstoffmessung im "Parts per Million (ppm)" Bereich: Als Messprinzip wurde hier das Fluoreszenzquenching ausgewählt. In der vom Messgas durchströmten Messzelle befindet sich ein mit einem Fluoreszenzfarbstoff belegter optischer Sensor. Die Anregung des Fluoreszenzfarbstoffs erfolgt durch eine, über einen Lichtwellenleiter angeschlossene, Lichtquelle. Die Anwesenheit von Sauerstoff führt zu mess- und auswertbaren Quenchingeffekten.
- Die beiden genannten Messprinzipien zur Sauerstoffmessung wurden im Projekt erstmals in einem gemeinsamen Gehäuse mit Auswerte-/Anzeigeeinheit integriert.
- Feuchtemessung im "Parts per Million (ppm) Bereich: Ein mit einem Schichtsystem versehener optischer Sensor befindet sich in einer vom Messgas durchströmten Messzelle und wird von einer Lichtquelle über einen Lichtwellenleiter bestrahlt. Die Anlagerung von Wasser führt zu einer Änderung des Brechungsindex des Schichtsystems was zu einer Wellenlängenverschiebung im reflektierten Licht führt. Aus dieser Wellenlängenverschiebung wird in der Auswertelektronik der Feuchtegehalt im Messgas ermittelt.

In den nachfolgenden Abbildungen ist das an der H2-Tankstelle realisierte Messsystem dargestellt.

Entwicklung eichfähige Wasserstoffmessung, Arbeiten der Sick AG

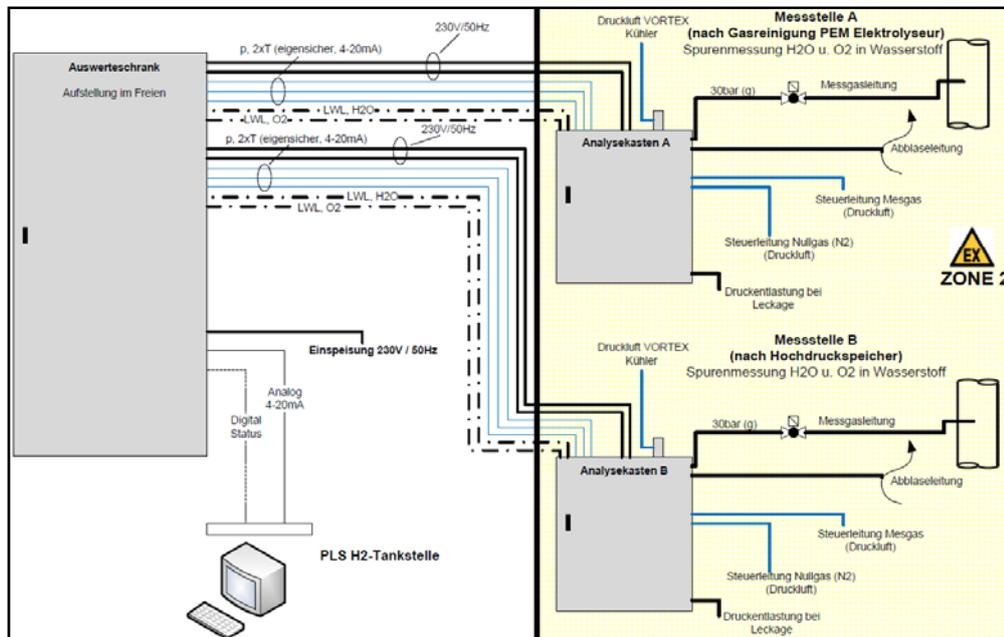


Abb. 60: Gasentnahme und Analyseschrank Stand Juli 2016



Abb. 61: Auswerteschrank (l.), Analysekasten (m.) und Montage an Tankstelle (r.)

Die Installations- und Inbetriebnahmearbeiten dauerten bis in den August hinein an. Erste Messergebnisse können im September / Oktober erwartet werden.

## 5 Zusammenfassung

Das Projekt „Wasserstoff-Infrastruktur Freiburg“ hatte eine Laufzeit vom 22.09.2014 bis zum 31.06.2016. Im Projekt haben die Partner Fraunhofer ISE (Koordinator), Hochschule Offenburg und Sick AG zusammen drei Forschungsinhalte im Bereich Wasserstoff-Mobilität und Mengen-/Qualitätsmessung bearbeitet:

Das Fraunhofer ISE hatte ursprünglich die Aufgabe, das hauseigene Testzentrum und die hauseigenen MW-Klasse-Teststände zu erweitern, um bei Elektrolyse-Tests entstehenden Abfallwasserstoff zu reinigen und zur Kapazitätserweiterung der hauseigenen H<sub>2</sub>-Tankstelle zu nutzen. Da sich im Verlaufe des Projektes abgezeichnet hatte, dass dies aufgrund von Komplikationen bei der Genehmigung nicht erreicht werden kann, wurde die Aufgabe des Fraunhofer ISE über einen Änderungsantrag an die Gegebenheiten angepasst und statt der Erweiterung des Testzentrums wurde eine Kapazitätserweiterung direkt an der H<sub>2</sub>-Tankstelle durchgeführt. Konkret ging es hierbei um folgende Nachrüstungen:

- einen weiteren Hochdruckspeicher zur Betankung größerer Fahrzeuge
- einen zweiten Mitteldruck-Kompressor zur Erhöhung der Produktionskapazität und Verfügbarkeit
- eine Anpassung der Abluft im Betriebsmittelraum, um hohe Innentemperaturen zu vermeiden und dadurch Lebensdauer und Effizienz der Vorkühlung zu verbessern
- Installation weiterer thermischer Massedurchflussmesser, um eine Massen-Bilanzierung der Tankstelle zu ermöglichen und vermutete H<sub>2</sub>-Verluste wissenschaftlich und transferierbar analysieren zu können
- Integration einer Elektrolyse-Leistungssteuerung und eines Start/Stop-Betrieb für den Elektrolyseur, um den wissenschaftlichen Erkenntnisgewinn bei der Langzeitbetrachtung des Elektrolyseurs zu verbessern
- Integration der Reinheitsmessung/Qualitätsmessung des Partners Sick (Beschreibung folgt unten) für den Feldtest

Zudem wurde das entwickelte Mengenmessgerät des Partners SICK in das hauseigene Testzentrum integriert, um projektnachgelagert das Gerät im Feldtest betreiben zu können. Sämtliche Nachrüstungen wurden erfolgreich installiert und im Rahmen der Abnahme die Wirksamkeit bewertet.

Die Sick AG hatte die Aufgabe eine Mengenmessung und Reinheit-/Qualitätsmessung für Erzeugungsanlagen zu entwickeln.

Bezüglich der Mengenmessung wurde hier das Verfahren der Ultraschalllaufzeit-differenzmethode gewählt. Die Ultraschalllaufzeitdifferenzmethode ist für die Volumenstrommessung in Erdgas ein etabliertes Messverfahren. Im Rahmen der Nutzung von Wasserstoff für die Mobilität ist auch die Volumenstrommessung an diesem Gas notwendig. Aktuell ist kein Verfahren bekannt, das Wasserstoff mit den typischen Messrandbedingungen bei Brennstoffzellenanwendungen messen kann. Aufgrund dessen war es Ziel des Projektes, die Eignung von Ultraschall für diese Messaufgabe zu untersuchen.

Eine Herausforderung bei der Anwendung der Ultraschalltechnologie für die Wasserstoffvolumenstrommessung stellt insbesondere die im Vergleich zu Erdgas ca. dreifach höhere Schallgeschwindigkeit dar. Neben den Effekten der Schallaufweitung und damit einhergehend der Reflexionsproblematik wird die Fehlergrenze insbesondere bei der Laufzeitdifferenzmessung beeinflusst.

Im Rahmen des Projektes wurde zum einen die Eignung eines konventionellen Zähleraufbaus getestet. Ursprünglich sollte aufgrund der geringen Volumenströme bei der Messaufgabe ein 1"-Zähler in die Versuchsanlage eingebaut werden. Leider zeigten die Versuche, dass aufgrund der geringen Messpfadlänge und damit der minimalen Laufzeitdifferenz ein starkes Übersprechen zwischen Send- und Empfangswandler hervorgerufen wird. Es ist nicht möglich, damit ein auswertbares Signal zu erhalten. Aufgrund dessen wurde entschieden, dass ein 2"-Zähler in die Versuchsanlage eingebaut wird. Bei dessen Einsatz ist die Empfehlung des minimalen Volumenstroms von 5 m<sup>3</sup>/h zu beachten. Versuche bei der PTB mit Wasserstoff bis zu einer Strömungsgeschwindigkeit von 10 m<sup>3</sup>/h sahen vielversprechend aus (höhere Volumenströme waren anlagenbedingt bei der PTB nicht möglich, andere Versuchsanlagen leider nicht verfügbar). Im Anschluss an das Projekt sollen nun kontinuierlich Versuchsdaten mit dem Zähler aufgenommen und für eine Weiterentwicklung genutzt werden.

Im Rahmen des Projektes wurden des Weiteren Grundlagenuntersuchungen zu einem alternativen Versuchsaufbau für Anwendungen an Gasen mit hohen Schallgeschwindigkeiten durchgeführt: Längerer Messpfad-Zähler. Bei diesem Zähler werden eine verlängerte Messstrecke, geringere Anstellwinkel der Sonden und höhere Strömungsgeschwindigkeit im Vergleich zum konventionellen Zählerdesign realisiert. Ein erstes Versuchsmuster für einen solchen Versuchsaufbau wurde erarbeitet, die damit durchgeführten Versuche mit Wasserstoff sahen bis zu einer Strömungsgeschwindigkeit von 80 m/s erfolgreich aus.

Leider konnte im Rahmen des Projektes das ursprünglich angestrebte Ziel der Entwicklung eines eichfähigen Zählers für Wasserstoff-Anwendungen nicht erreicht werden. Dies war zum einen in der Nicht-Verfügbarkeit eines entsprechenden Versuchsstandes und zum anderen in der schlechten Messperformance der konventionellen Zähler bei geringen Volumenströmen begründet. Das innovative Zählerdesign ist aktuell nur ein Versuchsaufbau und kein zulassungsfähiger Zähler. Um für diesen Zähler eventuell zukünftig eine Zulassung zu erreichen, sind weitere Grundlagenuntersuchungen und daran anschließend eine Geräteentwicklung notwendig.

Bezüglich der Qualitätsmessung wurden von der Sick AG zwei Analyseboxen und ein Auswerteschrank angefertigt. Die folgenden Messverfahren wurden eingesetzt:

- Paramagnetische Messung von Sauerstoff für Gaszusammensetzungen vor einer Deoxidationsstufe (mehrere Prozent Sauerstoff in Wasserstoff).
- Sensoren basierend auf dem Fluoreszenzquenching, um Sauerstoff in Größenordnungen von einstelligen ppm Anteilen im Messgas ermitteln zu können
- Sensor basierend auf einer Brechungsindexänderung um Wasser im einstelligen ppm Bereich im Messgas ermitteln zu können

Die Analyseboxen enthalten dabei die Sensoren sowie notwendige Systemkomponenten, um die geforderte Genauigkeit und Reaktionszeit sicher und bei minimalem Wasserstoffverlust erreichen zu können. Sensoren und Auswerteeinheiten wurden zum Projektende installiert – erste Messergebnisse werden im September / Oktober erwartet.

Aufgabe und Ziel der Hochschule Offenburg im Projekt war die Entwicklung eines neuen Ansatzes zur eichfähigen Mengenmessung. Notwendige Bedingung für die Eichfähigkeit ist zum einen eine ausreichende Messrichtigkeit, zum anderen muss Messbeständigkeit sichergestellt werden. Hierzu gehören bspw. Manipulationssicherheit, Elektromagnetische Verträglichkeit und Sensorbeständigkeit. Aufgrund der geforderten Manipulationssicherheit kommen Messmethoden wie bspw. das Wiegen der Fahrzeuge oder Tanksysteme nicht infrage, da diese vom Verbraucher

beeinflusst werden können. Deshalb soll ein Durchflussmesser basierend auf dem Düsenmessverfahren entwickelt werden.

Im Rahmen des Projektes wurden zunächst die Rahmenbedingungen bei Wasserstoffbetankungsvorgängen nach der Norm SAE J2601 erarbeitet. Basierend darauf wurde ein dynamisches Simulationsmodell entwickelt, welches die Berechnung der zeitlich veränderlichen Massen- und Volumenströme während der Betankung ermöglicht. Diese dienen als Grundlage für die Auslegung der Düsengeometrie sowie der benötigten Temperatur- und Druckmesstechnik. Parallel zu dem Durchflussmessgerät wurde ein gravimetrischer Teststand entwickelt, welcher es ermöglicht, die Messgenauigkeit der Düse zu untersuchen. Der Teststand ist mit einem Wasserstofftank ausgestattet, welcher während Betankungsversuchen befüllt werden kann um realistische Strömungsbedingungen zu erreichen.

Während den anschließenden Versuchen an der Wasserstofftankstelle des Fraunhofer ISE in Freiburg konnte gezeigt werden, dass die Messdüse sowie der Teststand funktionieren und das Düsenmessverfahren ein geeignetes Verfahren für Durchflussmessungen an Wasserstofftankstellen darstellt. Es konnten Messunsicherheiten im Bereich der Eichfähigkeit (um 1%) erreicht werden.

## 6 Sonstiges

### 6.1

#### Fortschritte auf diesem Gebiet bei anderen Stellen

Für die Arbeiten des Fraunhofer ISE sind Fortschritte bei anderen Stellen nur bedingt relevant, da in diesem Projekt nur Infrastrukturarbeiten und keine Forschungsarbeiten durchgeführt wurden.

Eine Tankstelle mit kontinuierlicher Messung der relevanten Verunreinigungen für eine PEM-Elektrolyse ist uns aktuell nicht bekannt.

Die Möglichkeit einer Langzeitcharakterisierung einer On-Site-PEM-Elektrolyse ist für die PEM-Elektrolyse des Herstellers im Labor durch Langzeittests vorhanden. Im Realbereich wird durch den Hersteller regelmäßig Daten bekannter Feldanlagen angefragt – das Fraunhofer ISE hat mehrfach Daten bereitgestellt. Diese sind jedoch einerseits nur Daten bei Nennlast, als auch i.d.R. ohne Start-Stop-Zyklen im Betrieb, in diesem Setting nur am Fraunhofer ISE möglich ist.

Bezüglich einer Vermessung von Wasserstoff-Verlusten dem Fraunhofer ISE aktuell kein weiteres Beispiel bekannt – entsprechende Messtechnik kann jedoch an anderen Tankstellen verfügbar sein. Es verbleibt die Problematik einer sehr ungenauen Abgabemessung, die für das Anlagensetting am Fraunhofer ISE nun etwas genauer charakterisiert wurde, wodurch Potenzial zu einer Verbesserung der Messgenauigkeit vorliegt – dies dürfte weiterhin einzigartig sein.

Im Bereich der Wasserstoff-Mengenmessung bei der Betankung, mit welchem sich die Hochschule Offenburg beschäftigt hat, sind auch einige Messtechnik-Hersteller tätig. Zwei Hersteller sind laut mündlichen Aussagen zuversichtlich, dass ihre weiterentwickelten Coriolis-Messgeräte in der Lage sind, die geforderten Messunsicherheiten im Bereich der Eichfähigkeit zu erreichen. Außerdem sollen die Coriolis-Messgeräte nach aktuellem Entwicklungsstand auch im Kaltbereich der Tankstelle (-40 °C) eingebaut werden können. Inwiefern diese Aussagen bereits durch Versuche validiert wurden, ist uns nicht bekannt.

### 6.2

#### Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Fraunhofer ISE hat in diesem Projekt mit dem TÜV-Süd als benannte Stelle für die Sicherheitsprüfung und Abnahme der H<sub>2</sub>-Tankstelle, dem Umweltschutzamt Abt. III/Gewerbeaufsicht für die Genehmigung der Änderungen und der Firma Air Products als Anlagenhersteller für die Detailplanung und Durchführung der Anlagenanpassungen zusammengearbeitet.

Die Sick AG hat in diesem Projekt mit der PTB für die Eichfähigkeitsmessungen des Mengennessers zusammengearbeitet.

Die Hochschule Offenburg hat in diesem Projekt mit der PTB zusammengearbeitet, um die Anforderungen an die Eichfähigkeit des Mengennessers an H<sub>2</sub>-Tankstellen und die Anforderungen an den gravimetrischen Teststand zu diskutieren und klären.

## 6.3

### Beitrag zu den Zielen des Förderprogramms des Zuwendungsgebers

Mit den Ergebnissen aus dem Projekt wurde das Zuwendungsziel einer Weiterentwicklung der Wasserstoffinfrastruktur in Baden-Württemberg durch die Kapazitätserweiterung und die Verbesserung der Verfügbarkeit der H<sub>2</sub>-Tankstelle des Fraunhofer ISE sowie die Erweiterung der Forschungsinfrastruktur für weitere relevanten Themen der H<sub>2</sub>-Mobilität erreicht.

Zudem wurde durch die (Weiter-)Entwicklung von Mengemessverfahren für dezentrale Erzeugungsanlagen (Sick AG) und Wasserstoff-Tankstellen (Hochschule Offenburg) die Technologieweiterentwicklung von kritischen Komponenten einer kommerziellen Wasserstoff-Infrastruktur erreicht.

## 6.4

### Nutzen / Verwertbarkeit / Konzept Ergebnis- und Forschungstransfer

Seitens Fraunhofer ISE geschieht die Verwertung der Nachrüstungen im geplanten Weiterbetrieb der H<sub>2</sub>-Tankstelle als Forschungsplattform zur Bearbeitung diverser Fragestellungen und für den Feldtest diverser Komponenten sowie über nachfolgende Projektanträge zur Untersuchung der genannten Fragestellungen im Bereich Langzeitanalyse Wasserstoff-Qualität, Langzeitanalyse Wasserstoff-Verluste und Langzeitanalyse Degradation. Ein Ergebnistransfer zur CEP als Zusammenschluss von Anlagenherstellern- und betreibern ist ebenso geplant.

Die Forschungsergebnisse der Hochschule Offenburg sowie das im Rahmen des Projekts getestete Funktionsmuster sind eine vielversprechender Ansatz für die eichfähige Mengemessung während der Betankung. Die Messergebnisse sowie mögliche Weiterentwicklungen stoßen unter anderem bei der CEP auf großes Interesse. Deshalb wird ein Folgeprojekt im Rahmen des BWplus-Programms angestrebt, mit dem Ziel, das Funktionsmuster zu einem eichfähigen Prototyp weiterzuentwickeln. Der parallel dazu entwickelte gravimetrische Teststand stößt auch bei Messtechnik-Herstellern auf Interesse, welche die Qualität ihrer Messgeräte untersuchen wollen. Hier sind gemeinsame Messkampagnen geplant.

Von Seiten der SICK AG werden die Daten aus der im Feldtest installierten Sensorik analysiert und ggf. als Basis für weitere Versuche und Untersuchungen verwendet.

## 6.5

### Veröffentlichungen

Seitens des Fraunhofer ISE sind jenseits des Abschlussberichtes keine weiteren Veröffentlichungen geplant.

Die Hochschule Offenburg bereitet zurzeit eine Veröffentlichung ihrer Forschungsergebnisse zur Mengemessung in einem Journal vor.

Derzeit ist von der SICK AG keine weitere Veröffentlichung geplant. Eine interne Veröffentlichung wird noch geprüft.

- [1] National Institute of Standards and Technology, Standard Reference Database REFPROP Version 22, Gaithersburg, USA, 2014.
- [2] SAE International J2601, Fueling Protocols for Light Duty Gaseous Hydrogen Surface Vehicles, USA, 2014.
- [3] R. Shaw, The influence of hole dimensions on static pressure measurements, University of Liverpool, 1959.
- [4] Roy R. Rayle Jr., An investigation of the influence of orifice geometry on static pressure measurements, Massachusetts Institute of Technology, 1949.
- [5] B J McKeon & A J Smits, Static pressure correction in high Reynolds number fully developed turbulent pipe flow, Princeton University, 2002.
- [6] Europäisches Parlament und Rat, Richtlinie 2014/68/EU, zur Harmonisierung der Rechtsvorschriften der Mitgliedsstaaten über die Bereitstellung von Druckgeräten auf dem Markt (Druckgeräterichtlinie), Straßburg, 2014.
- [7] OIML R139, Compressed gaseous fuel measuring systems for vehicles, Organisation Internationale de Métrologie Légale, Paris, 2014.