

Abschlussbericht

„Proof-of-Concept“ Vorversuche der Transferzählermethode zur Eichung von H₂-Tankstellen

von

Markus Jenne, Günther Schlumberger, Andrii Klymovskyi

Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoffforschung Baden-Württemberg (ZSW)

Rainer Kramer

Physikalisch-technische Bundesanstalt (PTB)

Förderkennzeichen: L7520140

Laufzeit: 17.11.2020 - 16.01.2021

Die Arbeiten dieses Projekts wurden mit Mitteln
des Landes Baden-Württemberg durchgeführt.

Januar 2021



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzbeschreibung der Forschungsergebnisse.....	3
1.1	Kurzzusammenfassung	3
2	Ausgangssituation, Zielsetzung und Vorgehensweise..	4
3	Durchführung und Ergebnisse des Vorhabens	5
3.1	Design und Prüfung des Vorversuchsaufbaus (PTB, ZSW)	5
3.2	Vorbereitung und Durchführung der Versuche (ZSW, PTB)	6
3.3	Auswertung und Ergebnisse (PTB, ZSW).....	7
4	Schlussfolgerungen und Verwertbarkeit	9
5	Anhang	10

1 Kurzbeschreibung der Forschungsergebnisse

Auf die Darstellung eines ausführlichen Zeitplans wird angesichts der kurzen Projektdauer (2 Monate, inklusive „Weihnachtspause“ vom 24.12.2020 bis 06.01.2021) verzichtet.

1.1 Kurzzusammenfassung

Im deutschen Mess- und Eichgesetz (MessEG) ist der Anspruch auf eichrechtskonforme Abgabe der Wasserstoffmenge an H₂-Tankstellen für die Nutzer von Brennstoffzellenfahrzeugen (Pkw, Nutzfahrzeuge, Züge) verbrieft. Die Konformität mit dem MessEG bzw. der international gültigen OIML R139 ist heute an keiner der 15 Hydrogen Refuelling Stations (HRS) in Baden-Württemberg gegeben. Ein hoher Handlungsdruck für die Betreiber von HRS und die beteiligten Industrieunternehmen zur Eichung der Abgabetechnologie von Wasserstoff als Kraftstoff mit geeigneten Eichnormalen besteht.

Aktuell sind in Deutschland drei Eichnormale auf gravimetrischer Basis von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) anerkannt, darunter eines der HS Offenburg. Die damit mögliche Eichung von HRS dauert sehr lange und ist nicht oder stark eingeschränkt für Nutzfahrzeug-HRS (H₂-Tanks >10kg) einsetzbar. Eichnormale auf Transferzählerbasis können hier Abhilfe schaffen, um schnell und skalierbar die Messungen für die Eichämter vor Ort vorzunehmen. Eine vorgelegte Projektskizze mit der HS Offenburg und der PTB als Partner verfolgt exakt diesen Ansatz mit verfügbarer Expertise aus Baden-Württemberg.

Ziel des vorab durchgeführten Kurzprojektes war es, herauszufinden, ob die Transferzählermethode mit Coriolis-Zählern, unter den angedachten Randbedingungen, für eichkonforme Messungen tauglich sein kann und welche Genauigkeiten erreichbar sind. Im Rahmen der Projektarbeit wurden an der HRS Ulm Schlüsselversuche durchgeführt, die die Tauglichkeit der Methode nachgewiesen haben. Gemeinsam mit dem Unterauftragnehmer PTB wurde der notwendige Messaufbau erarbeitet, vom Hersteller Theisen GmbH&Co KG in das H₂-Tankstellen-Abnahmegesetz (FkZ: BWH15001) des ZSW integriert und die Tests vor Ort in Ulm mit technischem Support des Herstellers der Zähler erfolgreich durchgeführt.

Das Ziel der Vorversuche, die grundsätzliche Eignung von Coriolisgaszählern als Transferzähler für die KB und Eichung von Wasserstofftankstellen nachzuweisen, konnte erreicht werden.

Die Ergebnisse und die Hardware stehen für die nachfolgende Umsetzung in einer systematischen Untersuchung mit der HS Offenburg und weiteren Partnern zur Verfügung. Beides kann für die akute Problemlösung an den Baden-Württembergischen H₂-Tankstellen, aber auch weit darüber hinaus, herangezogen werden.

2 Ausgangssituation, Zielsetzung und Vorgehensweise

Die Konformitätsbewertung (KB) und Eichung von Wasserstofftankstellen ist zur Einhaltung der Vorgaben des Mess- und Eichgesetzes als auch zur Einhaltung der relevanten Produktnormen regelmäßig durchzuführen und dient einer gerechten Abrechnung von Verbrauchern. Hierzu eignen sich verschiedene Verfahren, wobei derzeit gravimetrische Verfahren am weitesten entwickelt wurden. Gravimetrische Verfahren sind relativ aufwendig, da im Allgemeinen nur ein Tank zur Verfügung steht, der nach einer Befüllung entleert werden muss. Aus Gründen der Sicherstellung der Materialbeständigkeit darf die Entspannung nur mit einem begrenzten Durchfluss erfolgen. Tanktemperaturen unter- 40°C müssen unbedingt vermieden werden. Hinzu kommt, dass nach der zeitaufwendigen Entspannung der Tanks, je nach Aufbau und Wetterbedingungen, eine Betauung der Tanks und der Zuleitungen zu beobachten ist. Bisherige Erfahrungen zeigen, dass die gravimetrische Methode unterhalb von Außentemperaturen von 5 °C praktisch nicht anwendbar ist, zumal auch die Waagen vom Hersteller für niedrigere Temperaturen nicht ausgelegt sind. Eine deutlich vereinfachte Durchführung der KB kann erfolgen, wenn an Stelle der gravimetrischen Methode ein Transferzähler verwendet wird, der zwischen der Zapfpistole und zu betankenden Tanks angeordnet wird. Hierbei wäre es dann möglich, Tankbatterien oder sogar Fahrzeugtanks zu verwenden. Zur grundsätzlichen Erprobung dieser Methode wurde das hier beschriebene Projekt durchgeführt, bei dem die grundsätzliche Eignung der Methode erprobt werden sollte.

Im Vorhaben wurde die Tauglichkeit der Transferzählermethode, mit auf dem Coriolisprinzip basierenden Durchflussmessern, für die Eichung der Kraftstoffabgabe von H₂-Tankstellen (HRS) überprüft. Grundlegende Fragen werden beantwortet, wie hoch der Aufwand für den metrologisch einwandfreien Einsatz von Transferzählern in einem nachfolgenden Umsetzungsprojekt sein wird. Durch Erwerb eines der beiden geprüften Zähler wird die Hardware des Abnahmegeräts ertüchtigt um anschließend zur Problemlösung der Eichdefizite zur Verfügung zu stehen. Insbesondere in der angeführten Präsentation von Herrn Kramer (PTB) wird auf das Dilemma der zu langen Messzeiten mit gravimetrischen Eichnormalen und der möglichen Lösung durch Transferzählernormale und deren Rückführung eingegangen.

An der HS Offenburg wurden bereits mit Prototypen-Sensoren nach dem Messprinzip ‚Differenzdruck‘ erste Versuche unternommen. Im vorliegenden Projekt wurden CE-konforme und für die Anwendung zugelassene Durchflusszähler, die auf dem Coriolisprinzip basieren, für die Vorversuche herangezogen. Mit dem Coriolis-Prinzip besteht herstellerunabhängig die Möglichkeit, künftig kleinvolumige, hochgenaue und relativ preiswerte Zähler aus vorhandenen Produkten verschiedener Hersteller ableiten zu können. Zähler nach dem Coriolis-Prinzip sind heute in praktisch allen H₂-Tankstellen für die Mengenmessung verbaut und sind grundsätzlich für die Anwendung mit Wasserstoff unter extremen Druck- und Temperaturschwankungen geeignet. Als Transferzähler, zwischengeschaltet nach der Zapfpistole und dem Fahrzeugtank, fehlt bislang der Nachweis der Funktion als auch der benötigten Genauigkeit.

Im Verlauf des Projektes wurde eine Untersuchung im Rahmen des EU-Projektes „MetroHyve“ zur Transferzählermethode veröffentlicht (deHuu et.al., „Assessment of the Validity of the Master Meter Method compared to the Gravimetric Method for Calibration of Hydrogen Refuelling Stations“, <https://www.metrohyve.eu/downloads/>). Die Ergebnisse sind, vor allem aufgrund der hohen Abweichungen des Stationszählers der HRS Dübendorf/CH, als durchwachsen zu bezeichnen.

In regelmäßigen Abständen wird künftig eine Rückführung der Transferzähler-Normale mittels gravimetrischen Normalen notwendig werden. Die systematische Untersuchung der Rückführung soll, neben der Minimierung von Unsicherheitseinflüssen, Teil eines größeren Projektvorhabens mit der HS Offenburg und der PTB werden, zu dem bereits eine Projektskizze zur Förderung übergeben wurde.

Die genannten Potenziale der Transferzählermethode wurden anhand der PkV-Betankung ausgearbeitet, sind aber auf Betankung größerer Mengen, wie für Trucks, Busse und Züge, übertragbar.

3 Durchführung und Ergebnisse des Vorhabens

Ein „Proof-of-concept“ der Transferzählermethode für die Eichung der Kraftstoffabgabe von H₂-Tankstellen (HRS) wurde Ende 2020 an der HRS Ulm durchgeführt.

3.1 Design und Prüfung des Vorversuchsaufbaus (PTB, ZSW)

Ein Konzept für die korrekte, mechanisch spannungsfreie und flexible, Integration von Transferzählern in zwei Durchflussstufen in das vorhandene Abnahmesystem (FkZ: BWH 15001) des ZSW. Zwei Mengenzähler nach dem Coriolisprinzip wurden leihweise vom Hersteller zur Verfügung gestellt. Die Integration wurde eng mit der für Metrologie zuständigen PTB und Herstellungspartner Theisen abgestimmt.

Für die Corioliszähler war es sehr wichtig, dass diese möglichst spannungsfrei eingebaut wurden. Dies wurde durch Einbau an geeigneter Stelle im Abnahmegesetz mittels einer Rohrschleife und Fixierung am Zähler erreicht.

Auch war darauf zu achten, dass der thermische Kontakt zu anderen Bauteilen gering ist. Hier wurde an den Befestigungsstellen eine stabile Kunststoffplatte zwischen Halter und Zähler integriert, was als Kompromiss zwischen mechanischer Stabilität für den Transport der in einen Anhänger verbauten Apparatur auf der Straße und den thermischen Anforderungen zunächst genügte. Alle Einbauteile mussten für Temperaturen bis -40°C geeignet sein.

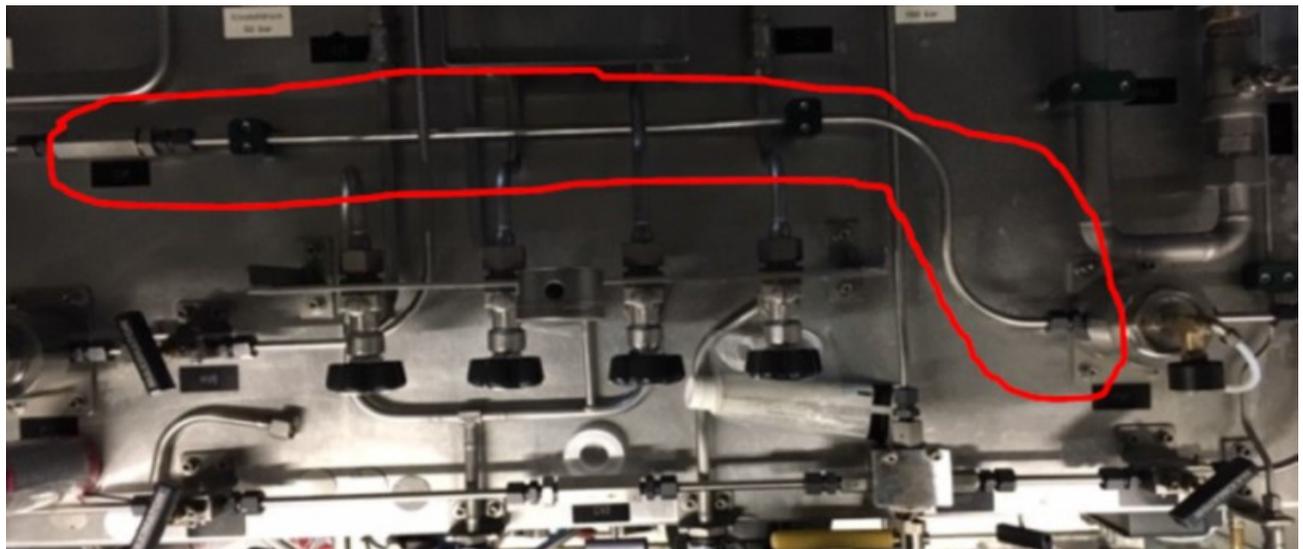


Abbildung 1: Draufsicht des Bauzustands vor Integration der Zähler. Rot umrandet die Einbaustrecke

Da zwei Zählertypen mit unterschiedlicher Baugröße und Nenndurchfluss zur Verfügung standen, wurden für beide die passenden Anschlussstücke und Befestigungen konfiguriert und geliefert. Der finale Einbau und die Dichtigkeitsprüfung der Zähler wurden durch das ZSW durchgeführt.

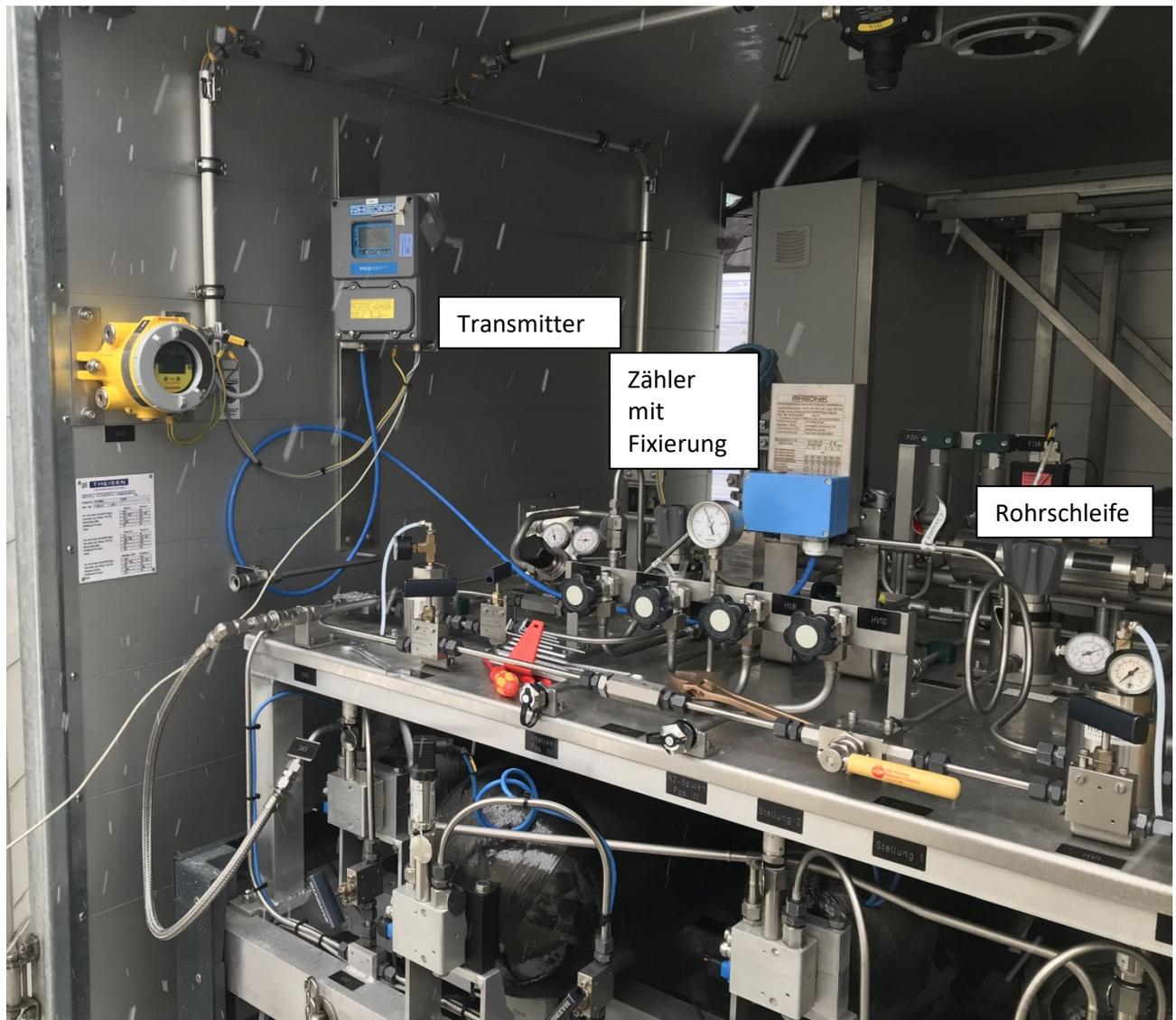


Abbildung 2: Rückansicht des H₂-Fuel Station Test Module (H₂-FSTM) mit integriertem Coriolis-Zähler Rheonik RHM04L

3.2 Vorbereitung und Durchführung der Versuche (ZSW, PTB)

Als notwendige Vorbereitung wurde die Hardware in den Abnahmehänger, gemäß den Ergebnissen von AP1, integriert (Abbildung 2). Für die Integration der Zähler in das nach Druckgeräterichtlinie und BetrSichV aufgebaute Abnahmegerät des ZSW, H₂-FSTM, kam mit vertretbarem Definitionsaufwand nur der Hersteller Theisen GmbH in Frage.

Da zwei Zählertypen mit unterschiedlicher Baugröße und Nenndurchfluss zur Verfügung standen, wurden für beide die passenden Anschlussstücke und Befestigungen konfiguriert und geliefert. Der finale Einbau und die Dichtigkeitsprüfung der Zähler wurden durch das ZSW durchgeführt. Die Unterstützung durch den Betreiber der HRS Ulm, die Firma H2 Mobility, wurde final abgestimmt und Rahmenbedingungen für die Tests, neben den Sicherheitsvorkehrungen die Zugänglichkeit von Kunden auch während der Testzeiten zur HRS, geklärt.

Zur Erprobung der Methode wurde als Transferzähler zuerst ein Corioliszähler der Fa. Rheonik (Typ RHM 04 mit Transmitter RHE28) eingesetzt, der typgleich in Wasserstofftankstellen mit einem nominellen Betankungsdruck von 700 bar verwendet wird. Der Zähler wurde in den Abnahmehänger des ZSW Ulm

eingebaut, der über 4 Tanks mit einer Kapazität von dreimal 1,4 kg und einmal 2,3 kg verfügt. Der Zähler wurde stromabwärts zu einem Rückschlagventil und vor einem Sammler, von dem jeweils über ein Absperrventil die einzelnen Tanks befüllt werden können, eingebaut (siehe Abbildung 1). Zwischen der Betankungsdüse und dem Corioliszähler sind weitere Armaturen verbaut, dies betrifft einen Drucksensor und unmittelbar hinter der Betankungsdüse einen Temperatursensor.

Die Messdaten des Corioliszählers konnten mit Hilfe einer Diagnosesoftware (RHEComPro+) des Herstellers während der Betankungsversuche beobachtet und geloggt werden. Ein Vergleich der Massemessung der Tankstelle und des Zählerfortschritts des Corioliszählers war an Hand der Daten möglich. Ferner wurden insbesondere der Nullpunkt des Zählers, sowie die Rohrtemperatur des Zählers beobachtet und dokumentiert. Da das Betankungsprotokoll der H₂-Tankstellen (700 bar) eine Abkühlung des Wasserstoffs auf -33°C bis -40 °C an der Zapfpistole innerhalb von 30 s vorsieht, ist eine starke Umtemperierung der Temperatur des Transferzählers zu erwarten, die sich sowohl auf den Nullpunkt als auch auf die Korrektur der Rohrtemperatur auswirkt. Insofern sollte auch untersucht werden, inwieweit eine Isolierung der Zuleitungen als auch des Coriolisgaszählers selbst, die Umtemperierung beeinflusst. Es wurden deshalb nach einem ersten Betankungszyklus, bei dem nacheinander die 4 Tanks (jeweils mit einer Unterbrechung von ca. 3 min, die zur Herstellung vom definierten Anfangszustand in der Leitung von der Zapfdüse zum Zähler genutzt wurden) befüllt und die Daten dokumentiert wurden, ein zweiter Zyklus gefahren, wobei zuvor eine behelfsmäßige Isolation (Abbildung 4) des Zählers und der Zuleitung erfolgte. Abschließend wurde eine Betankung durchgeführt, bei der alle Tanks gleichzeitig befüllt wurden, um einen möglichst großen Durchfluss zu erzeugen. Diese Messung sollte darüber Aufschluss geben, ob die Tankstelle mit dem zusätzlich eingebauten Coriolisgaszähler noch die Vorgaben des Betankungsprotokolls nach SAE J2601 (Version 2010 für HRS Ulm) einhalten kann, da der Coriolisgaszähler zusätzliche Druckverluste bewirkt.

Da der für den H₂-Durchfluss bis 60g/sec passendere Zähler RHM 04L die Funktion der HRS nicht beeinträchtigte, wurde auf Tests mit dem für größere Durchflüsse geeigneten RHM 08L aufgrund der erwartbar schlechteren Messrichtigkeit verzichtet. Der Mengenzähler RHM04L verblieb im Abnahmegerät integriert.

3.3 Auswertung und Ergebnisse (PTB, ZSW)

Danach folgten systematische Tests an der HRS Ulm innerhalb von 2 Wochen. Mitarbeiter der PTB, oberste Instanz bei allen Fragen des richtigen und zuverlässigen Messens in Deutschland, haben die Versuche vor Ort begleitet.

Während der Betankungsversuche wurden die oben genannten Daten bestimmt. Die Werte sind in der Tabelle 1 (Anhang) dargestellt. Ebenfalls im Anhang sind Beispiele für die Auswertung der Logdaten zu finden. Es ist feststellbar, dass bei der Betankung des ersten Tanks die Rohrtemperatur des Zählers von etwa Umgebungstemperatur auf -26 °C absinkt, also höher als die vorgeschriebene Wasserstofftemperatur ist. Dies ist auf die thermische Trägheit der Rohre (auf Grund der Wärmekapazität der Rohre) zurückzuführen. Die Rohrtemperatur steigt bis zum Beginn der Betankung des 2 Tanks wieder an, was auch auf den Einfluss des Gehäuses des Zählers zurückzuführen ist. Bei Beginn der zweiten Betankung ist die Rohrtemperatur deutlich niedriger als bei der ersten Betankung da noch kein thermischer Ausgleich mit der Umgebung erfolgen konnte. Während der 2. Betankung erreicht die Rohrtemperatur des Coriolisgaszählers das vorgeschriebene Temperaturband. Bei der dritten und vierten Betankung sind die Verhältnisse ähnlich wobei die Anfangstemperaturen der Rohre jeweils niedriger sind was auf eine vollständigere Umtemperierung des Zählers hindeutet. Die Beobachtung wird auch dadurch unterstützt, dass eine weitere Temperatur im Zähler (die Temperatur des Torsionsstabs im Zähler) bei den Betankungen sukzessive abnimmt. Diese Temperatur geht aus den Logdaten des Zählers hervor.

Der Zählernullpunkt konnte dadurch beobachtet werden, dass jeweils vor und nach der Betankung durch das Betankungsprotokoll der Durchfluss Null ist. Da stromauf zum Zähler ein kleines Volumen vorhanden ist könnten Umtemperierungsvorgänge in den Rohrleitungen einen kleinen Durchfluss erzeugen. Es ist festzustellen, dass sich nach dem ersten Betankungsvorgang der Nullpunkt etwas nach plus bewegt (von $Q_{N1} = 0,0005 \text{ kg/min}$ auf $Q_{N2} = 0,008 \text{ kg/min}$).

Am Beginn des zweiten Betankungsvorgangs ist dieser Durchfluss noch nicht auf den Anfangszustand vor der ersten Betankung zurückgegangen jedoch auf $Q_{N_2} = 0,005 \text{ kg/min}$ gefallen. Dieses Verhalten ist auch bei den Betankungen 3 und 4 zu beobachten (Abbildung 6, Anhang).

Bei den Betankungsversuchen mit Isolierung (No. 5-8, vgl. Tabelle 1) sind die Beobachtungen ähnlich, jedoch sind alle Anfangs- und Endtemperaturen etwa 2- 3°C niedriger.

Bei der gleichzeitigen Betankung aller Tanks (6,7kg H₂-Kapazität, No.9) ergeben sich ähnliche Beobachtungen wie bei der Betankung jeweils des ersten Tanks der oben beschriebenen Zyklen.

Die vom Zähler gemessenen Massen wurden jeweils am Beginn und am Ende der Betankungen dokumentiert. Da der mittlere Nullpunkt höher als 0 war, ist eine Korrektur des Massenfortschritts mit dem Produkt aus mittlerem Nullpunkt und Betankungszeit sinnvoll. Dieses Vorgehen ist einer Schleichmengenunterdrückung (cut off) vorzuziehen, da nicht exakt justierte Nullpunkte zu erheblichen Fehlern führen können. Wie oben dargestellt ändert sich der Nullpunkt auch während der Betankung, das heißt eine Justierung am Beginn der Betankung würde den Einfluss nur teilweise kompensieren.

Tabelle 2 zeigt den Vergleich des Massenfortschritts des Zählers im Vergleich mit dem Messergebnis der Tankstelle ohne und mit Nullpunktkorrekturrechnung.

Abschätzung von Unsicherheitseinflüssen

Eine belastbare Abschätzung von Unsicherheitseinflüssen war nicht Ziel der Vorversuche und konnte auch nicht erfolgen, da der als Referenzwert genutzte Anzeigewert der Tankstelle nicht geeicht ist und der eingebaute Zähler seit der Inbetriebnahme auch nicht kalibriert wurde.

Weitere Unsicherheitseinflüsse sind:

- Auflösung der Tankstellenanzeige
- Konstanz und Wert der Abblasmenge nach einer Betankung (Entspannung des Betankungsschlauchs und den Armaturen/ der Rohrleitung vor Transferzähler)
- Gastemperatur im Massemesser der Tankstelle

Zur messtechnischen Beurteilung ist deshalb ein Projekt erforderlich, bei dem sowohl die Kalibrierung des Referenzzählers als auch die erreichbare Unsicherheit des Transferzählers umfassend betrachtet wird.

Im vorliegenden Projekt wurde Support des Sensorherstellers für die Durchführung, Auswertung und Bewertung der Messungen großzügig gewährt. Die Ergebnisse sind in jedem Fall messprinzipbezogen, also herstellerunabhängig, verwendbar.

4 Schlussfolgerungen und Verwertbarkeit

Das Ziel der Vorversuche, die grundsätzliche Eignung von Coriolisgaszählern als Transferzähler für die Konformitätsbewertung und Eichung von Wasserstofftankstellen nachzuweisen, konnte erreicht werden. Der Zähler zeigt aber erwartungsgemäß eine starke Umtemperierung der Messrohre und weiterer Bauteile des Zählers, da die Vorgaben des Betankungsprotokolls eine Wasserstofftemperatur von -33 bis -40°C nach einer vergebenen Zeit fordern. Diese Umtemperierung hat einen Einfluss auf die Messrichtigkeit des Transferzählers, die weiter untersucht werden muss, wobei z.B. durch eine Vorabtemperierung der Zähler eine Verbesserung erreicht werden könnte, die Untersuchungsgegenstand nachfolgender Projekte sein muss. Das Betankungsprotokoll nach SAE J2601:2010 konnte im gesamten Bereich der untersuchten Tankgrößen eingehalten werden, bzw. es wurde keine Störung durch die Tankstellensteuerung detektiert (Abbildung 5, Anhang).

Eine Nullpunktkorrektur auf Basis der Durchflussmesswerte (ohne physischen Durchfluss) vor und nach den Betankungsvorgängen ist möglich und führt zu einer Reduktion des Unsicherheitseinflusses der Nullpunktdrift.

Das Vorhaben förderte die Kompetenz in Baden-Württemberg zu metrologischen Fragestellungen, die aktuell für den Kraftstoff Wasserstoff weltweit noch offen sind. Die 2018 überarbeitete Version der OIML R139 bietet erstmals realistische Anforderungen an die Messrichtigkeit der Mengenmessung an HRS. Die Umsetzung wird auch für die 15 in B-W in Betrieb befindlichen und alle neu zugebauten HRS für PkW und Heavy-duty Anwendungen essentiell.

Im Rahmen des Projektes „Vorversuche der Transferzählermethode zur Eichung von H₂-Tankstellen“ wurde das Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoffforschung (ZSW) durch Investition in zukunftsfähige Geräte in die Lage versetzt, den Aufbau von Wasserstoffinfrastruktur in Baden-Württemberg und darüber hinaus nachhaltig zu unterstützen.

Zusammenarbeit mit anderen Stellen

- Abstimmung der metrologischen Anforderungen mit dem Unterauftragnehmer PTB
- Abstimmung der regulatorischen und technischen Randbedingungen mit der H₂ Mobility und der Clean Energy Partnership (CEP).
- Nutzung der Ergebnisse in einem, sofern Fördergelder eingeworben werden können, nachfolgenden Umsetzungsprojekt mit den Projektpartnern HS Offenburg, PTB und Herstellern

Die Forschungsergebnisse tragen über den Einbezug des Unterauftragnehmers PTB, eines der größten Institute in der internationalen Metrologie-Community, und dem Betreiber der HRS Ulm, H₂ Mobility, für die Lösung der akuten und langfristigen Fragestellungen bei der Erfüllung des MessEG an Wasserstoff-Tankstellen bei. Nicht zuletzt werden die Partner der vorgelegten Projektskizze „H₂Flow-bw“ von den Ergebnissen profitieren, indem der Projektplan konkretisiert werden kann.

Eine Veröffentlichung in einer deutschsprachigen Fachzeitschrift ist in Klärung.

Die Verfasser des Berichts möchten sich für die Förderung des Projekts durch das Ministerium für Umwelt und Naturschutz Landes Baden-Württemberg, über den Projektträger Karlsruhe, Förderkennzeichen L7520140, bedanken.

5 Anhang

Tabelle 1: Übertragung des Hand-Aufschriebs der Messkampagne vom 9.12.2020

No	Uhrzeit	FSTM			RHEComPro+						HRS	Werte Tanks FSTM				
		Tank No.	Vol. L	Kap. Kg	Q_01 kg/min	Q_02 kg/min	T_01 °C	T_02 °C	m_01 kg	m_02 kg	m_HRS kg	p_01 bar	p_02 bar	T_01 °C	T_02 °C	
1	12:22	2	36	1,44	0,0002	0,08	0,4	-25,0	20,33	21,67	1,33	5,7	754	-1,7	60	
2	12:30	3	36	1,44	0,007	0,007	-16,0	-31,0	21,709	23,906	2,23	28,9	757	-2,7	41,7	
3	12:40	4	36	1,44	0,005	0,008	-21,0	-28,0	23,933	25,338	1,37	22,4	758	-1,4	56,9	
4	12:51	5	36	1,44	0,006	0,008	-22,0	-29,0	25,367	26,75	1,34	26,5	741	-0,4	52	
5	14:45	2	36	1,44	0,0002	0,009	-1,1	-26,0	26,81	28,19	1,35	24,1	744	-9,1	52	
6	14:54	3	36	1,44	0,006	0,006	-17,3	-32,3	28,21	30,45	2,28	25,5	759	-1,1	37	
7	15:01	4	36	1,44	0,005	0,008	-23,2	-32,0	30,47	31,87	1,36	25,9	741	-7,2	49	
8	15:08	5	36	1,44	0,0055	0,008	-24,3	-31,8	31,901	33,3	1,36	22,9	756	-4,8	54	
9	16:30	alle	166	6,7	0	0,01	-6,8	-27,5	33,39	38,538	5,44	44	600	-21	35	
							vor	nach								
							Temperaturaufschrieb des Zählers der HRS									
							Bet. 5	0,7	-0,4							
							Bet. 7	7	1,4							
							Bet. 8	9								
							Bet. 9		-4,7							



Abbildung 3: Anordnung FSTM an der H2-Tankstelle Ulm



Abbildung 4: (rechts) der Aufbau mit Isolierung

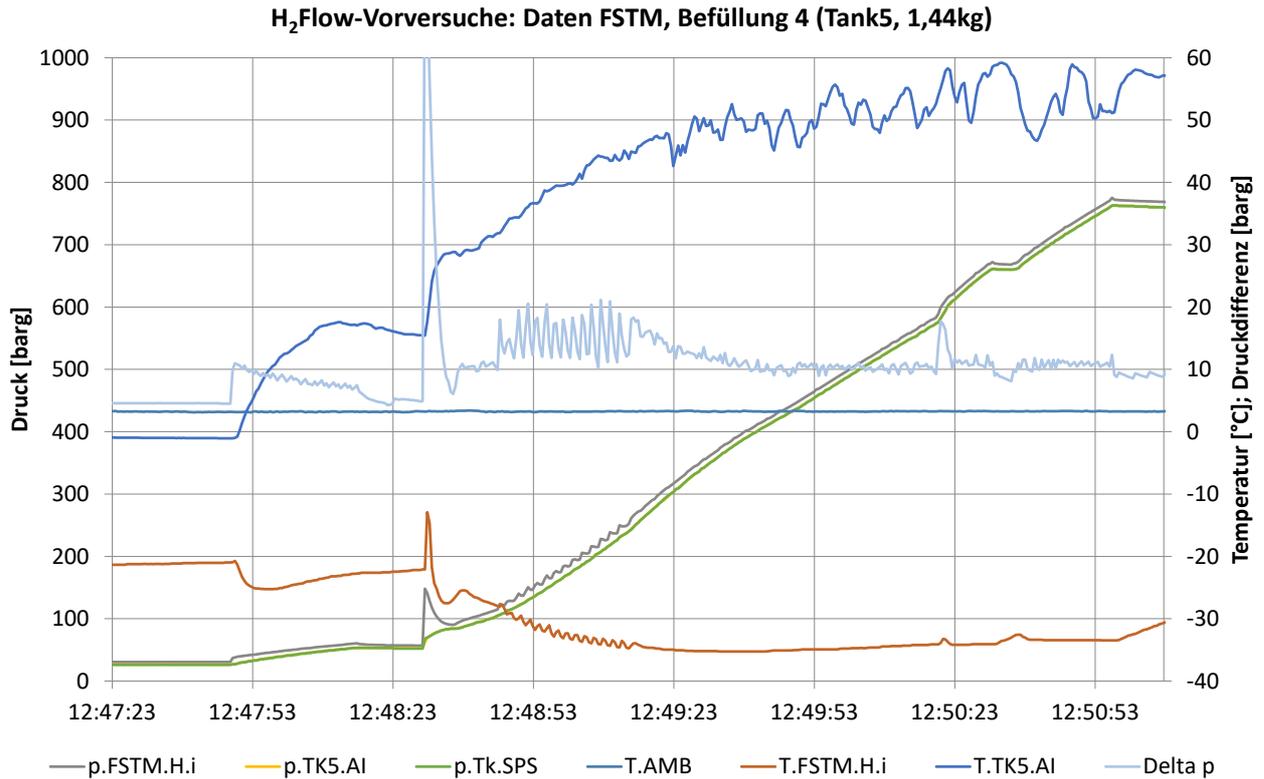


Abbildung 5: Betankungsdaten des H₂-FSTM, Betankung No.4, ohne Isolierung von Zähler und H₂-Zuführung

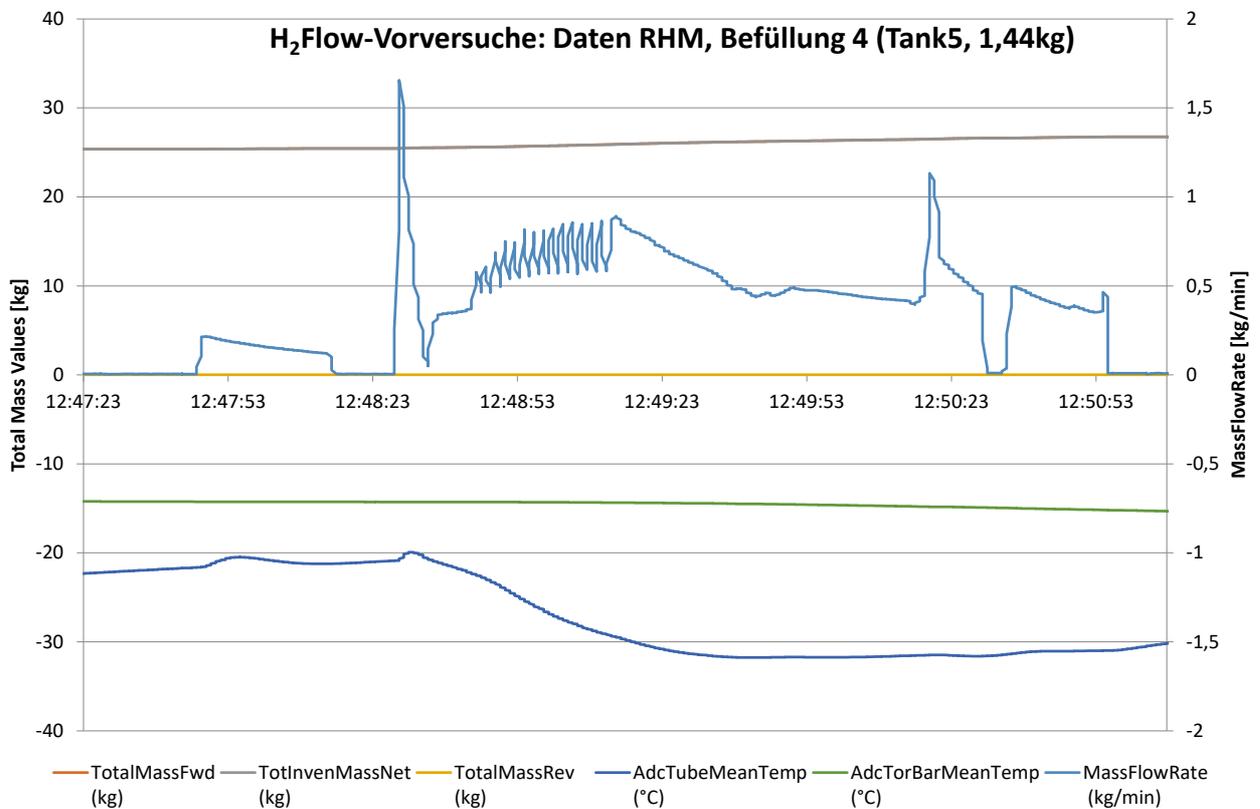


Abbildung 6: Messwerte des Coriolis-Zählers, Betankung No.4, ohne Isolierung von Zähler und H₂-Zuführung