

Durchflußmessung von flüssigem Wasserstoff im Bereich 1 bis 10 m³/h

Dr. Christoph A. Schug, Höllriegelskreuth

Zusammenfassung

Die Befüllung von Labor- und Fahrzeugtanks mit flüssigem Wasserstoff soll innerhalb weniger Minuten durchführbar sein, wobei die Vermessung der abgegebenen Menge den Kriterien des eichpflichtigen Warenverkehrs genügen soll. Der Prototyp eines geeigneten Durchflußmessers wurde mit einem Aufnehmer nach dem Coriolis-Prinzip aufgebaut. Dabei wird die Trägheitskraft bei einer Zwangsschwingung der Rohrleitung quer zur Strömungsrichtung als Phasenverschiebung gemessen und direkt in fließende Masse umgerechnet. Die ersten Vermessungen auf einem gravimetrischen Prüfstand ergaben, daß die Anforderungen der PTB in den oberen zwei Dritteln des Meßbereichs erfüllt werden. Konstruktive Verbesserungen sind in Arbeit.

1. Einleitung

In den letzten Jahren ist flüssiger Wasserstoff (LH₂) aus der wenig beachteten Existenz als exotischer Treibstoff der Raumfahrt ins Licht der Öffentlichkeit getreten. Großprojekte wie das Euro-Quebec Wasser-Wasserstoff Pilot Projekt [1] und das Solar-Wasserstoff-Projekt Neunburg vorm Wald [2] zeigen die umweltfreundliche und sichere Handhabung des flüssigen Wasserstoffs von der Erzeugung aus regenerativen Energien bis hin zum Einsatz in PKW [3] und LKW [4]. Sobald die politisch-ökologische Wichtung die Wirtschaftlichkeit des flüssigen Wasserstoffs gegenüber herkömmlichen Treibstoffen verbessert, wird eine eichfähige Vermessung der abgegebenen Menge erforderlich. Linde als Lieferant von flüssigem Wasserstoff und kryotechnischen Anlagen hat sich dieser Aufgabe angenommen [5].

2. Die Anforderungen

Der Meßbereich von 1 bis 10 m³/h ergibt sich aus der Zielgruppe Labor- und Fahr-

zeugtanks, wo z. B. das Tanksystem eines Wasserstoffbusses innerhalb von 5 Minuten mit 600 Litern flüssigem Wasserstoff gefüllt sein soll. Dies entspricht 7,2 m³/h. Selbstverständlich müssen die Regeln des Explosionsschutzes eingehalten werden, da Wasserstoff mit Luft oder Sauerstoff über weite Mischungsbereiche ein explosionsfähiges Gemisch bilden kann.

Dies ist jedoch nicht so kritisch, da der flüssige Wasserstoff wegen seiner thermischen Isolierung durch ein leicht zu überwachendes Vakuum von der Luft getrennt ist. Die Forderungen bezüglich der Eichfähigkeit sind in Deutschland durch eine vorläufige Richtlinie der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt [6] festgehalten, wobei die endgültige Formulierung für das je-

weilige kryogene Medium nach dem Stand der Technik festgelegt wird. Im wesentlichen fordert die Richtlinie eine Meßgenauigkeit von 1,5 % der Menge bei größeren Mengen und 3,0 % bei der anzugebenden Kleinstmenge. International gibt es eine vergleichbare Richtlinie [7].

3. Das Meßprinzip

Der Begriff der Menge ist physikalisch ungenau. Es werden damit Volumina, Massen und Stückzahlen bezeichnet. Bei flüssigem Wasserstoff empfiehlt sich die Verwendung der Masse als zu messende Größe, weil sie dem Gehalt an verwertba-

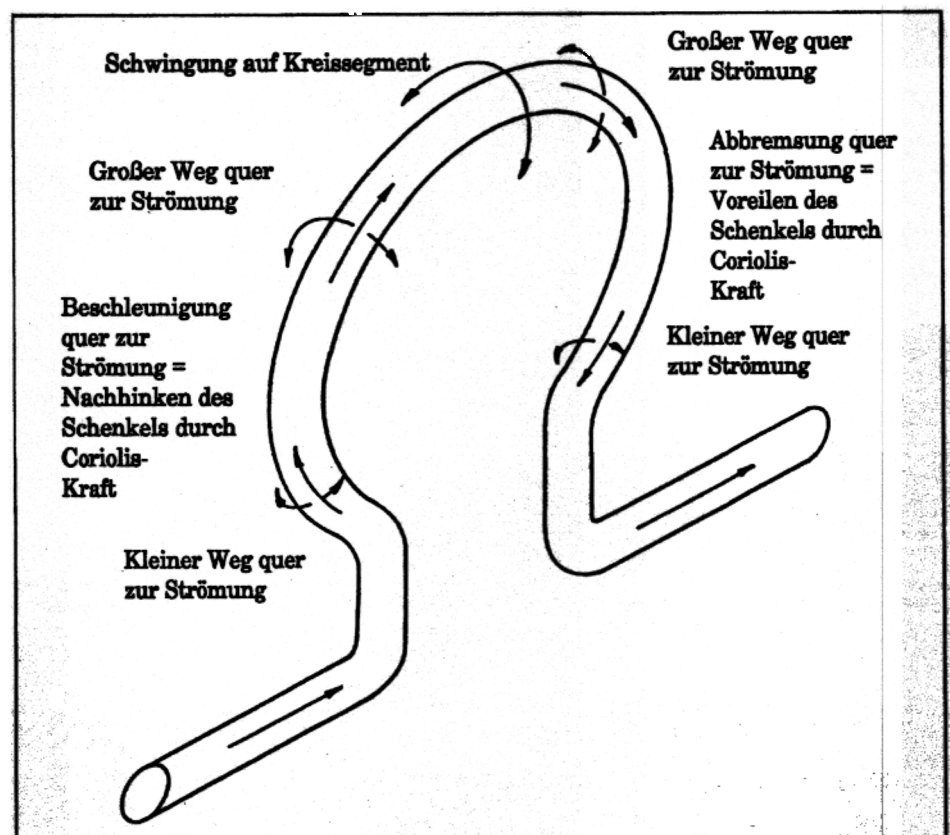


Bild — Massendurchflußmessung nach dem Coriolis-Prinzip

rer Energie des Wasserstoffs direkt proportional ist. Während Volumen-Durchflussmesser nach dem Prinzip der Geschwindigkeitsmessung erst über Druck und Temperatur in Masse umrechnen müssen, ermittelt der Durchflussmesser nach dem Coriolis-Prinzip die fließende Masse unabhängig von der Dichte. *Bild 1* zeigt das Prinzip. Die Rohrleitung wird zu einer Art Omega gebogen. Während die „Füße“ des Omegas fixiert sind, wird der Bogen des Omegas durch Elektromagnete zu einer Zwangsschwingung auf einem Kreissegment angeregt. Die Flüssigkeit in der Rohrleitung muß dieser Schwingungsbewegung folgen und wird deshalb im aufsteigenden Ast des Omegas quer zur Strömungsrichtung beschleunigt. Im absteigenden Ast, wo die Schwingungswege wieder kürzer werden, wird die Flüssigkeit quer zur Strömungsrichtung abgebremst. Die Trägheitskräfte, die zu Ehren des französischen Physikers C. G. Coriolis (1792 - 1843) als Coriolis-Kräfte bezeichnet werden, sind in beiden Fällen deshalb entgegengesetzt. Sie können als Phasenverschiebung der beiden Äste des Omegas abgegriffen werden. Die Phasenverschiebung wird dann direkt in fließende Masse umgerechnet.

4. Der Prototyp

Ein käuflicher Coriolis-Aufnehmer wurde in der Elektronik und Elektromechanik vom Hersteller so modifiziert, daß er die tiefen Temperaturen aushält (Siedepunkt unter Normalbedingungen 20° K). Dieser Aufnehmer wurde nach Umbau des Einströmbereichs in einen speziellen Isolierbehälter eingebaut, der gute Isolierung bei kleiner Behältermasse und kleinem Behältervolumen bietet. Mit 650 mm Höhe und 400 mm Durchmesser ist der jetzige Behälter nur unwesentlich größer als die darin enthaltenen Omega-Rohrschleifen. Der Wärmefluß in den Behälter kann durch die Linde-Isoliertechnik [8] auf unter 1 Watt begrenzt werden. Hinzu kommen noch einmal 0,2 Watt durch die Spulen der Zwangsschwingung. Die gute Isolierung ist aus zwei Gründen nötig: zum einen soll möglichst wenig Wasserstoff verdampfen, weil flüssiger Wasserstoff abgefüllt werden soll. Zum anderen darf der Gasanteil im Durchflussumnehmer nicht zu groß werden, weil sonst der Wasserstoff der Zwangsschwingung durch Kompression ausweichen kann, und damit das Meßergebnis verfälscht wird. Der Leistungseintrag von

1,2 Watt entspricht einer Verdampfung von kleiner 0,7 Vol-% bei kleinstem Durchsatz, was von Coriolis-Aufnehmern erfahrungsgemäß noch gut verkraftet wird.

5. Der Prüfstand

Bild 2 zeigt den gravimetrischen Prüfstand, wie er speziell zur Überprüfung der LH₂-Durchflussmesser entwickelt wurde. Unwesentliche Teile, wie die Sicherheitseinrichtungen, die Spül- und Befüllleitungen und die Temperatur- und Druckmeßeinrichtungen sind weggelassen worden. Im Vorratstank D1 wird der flüssige Wasserstoff bereit gehalten. Bei Beginn der Prüferie ist der Starttank D2 kaltgefahren und voll, der Zieltank D5 kaltgefahren und leer. Der Starttank wird auf einen Druck in der Größenordnung um 1 bar mit gasförmigem Helium aufgedrückt und der zu vermessende Durchfluß über das Ventil FC eingestellt. Sowohl die Steuerung des Versuches als auch die Erfassung der Daten erfolgen mittels Personal Computer (PC). Zur Erreichung der für einen derartigen Prüfstand nötigen Genauigkeit mußte eine Spezialwaage angeschafft werden, die bei Tankgewichten um 600 kg eine Meßgenauigkeit von 10 g aufweist. Zudem kann die aus dem Zieltank entweichende Menge an verdampftem Gas nicht vernachlässigt werden und wird deshalb ebenfalls per PC registriert. Für den längeren Be-

trieb des Prüfstandes ist die Anschaffung einer LH₂-Pumpe in Planung, weil die Verluste beim Aufdrücken der Tanks die hohen Kosten für LH₂-Pumpen rechtfertigen.

6. Ergebnisse

Eine exemplarische Messung wird mit den wichtigsten Daten in *Bild 3* gezeigt. Bei Sekunde Null wird das Ventil geöffnet, und der Überdruck im Starttank fördert den flüssigen Wasserstoff in den Zieltank. Der Durchfluß (Kurve 3) steigt bis auf seinen Plateau-Wert an und verbleibt dort bis ab Sekunde 92 das Ventil wieder zugefahren wird. Sobald flüssiger Wasserstoff in der Waage ankommt, steigt der angezeigte Wert (Kurve 2) vom Tarawert 0 bis zu einem stabilen Endwert von ca. 15,5 kg. Dies entspricht ca. 220 Litern. Die Auswertung des Meßfehlers (Kurve 1) geht vom ungünstigen Fall des „Stehenden Start Stop“ aus, d. h. Waage und Durchflussmesser werden von Sekunde Null an verglichen. Von dem Integral des Durchflusses ab Sekunde Null wird der Zuwachs auf der Waage (korrigiert auf das aus dem Wiegebehälter verdampfte Gas) abgezogen, und die Differenz geteilt durch den korrigierten Waagenwert als Meßfehler berechnet. Ab Sekunde 40 wird die Meßgenauigkeit für Kleinstmengen von 3 % erreicht. Ab Sekunde 43 ist die Meßgenauigkeit von +/- 1,5 % gewährleistet, die bei

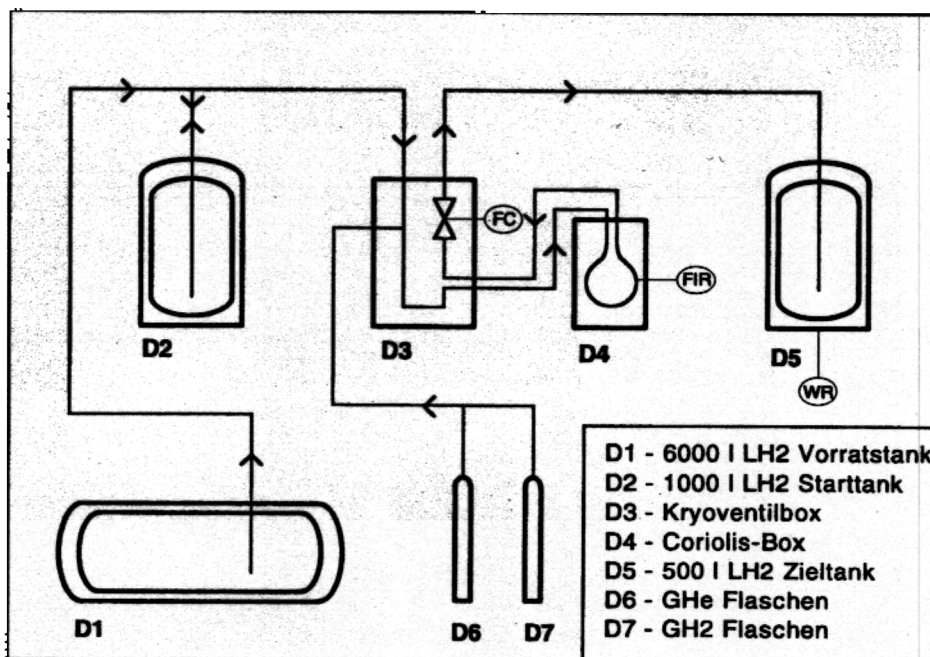


Bild 2 Schema des Prüfstandes

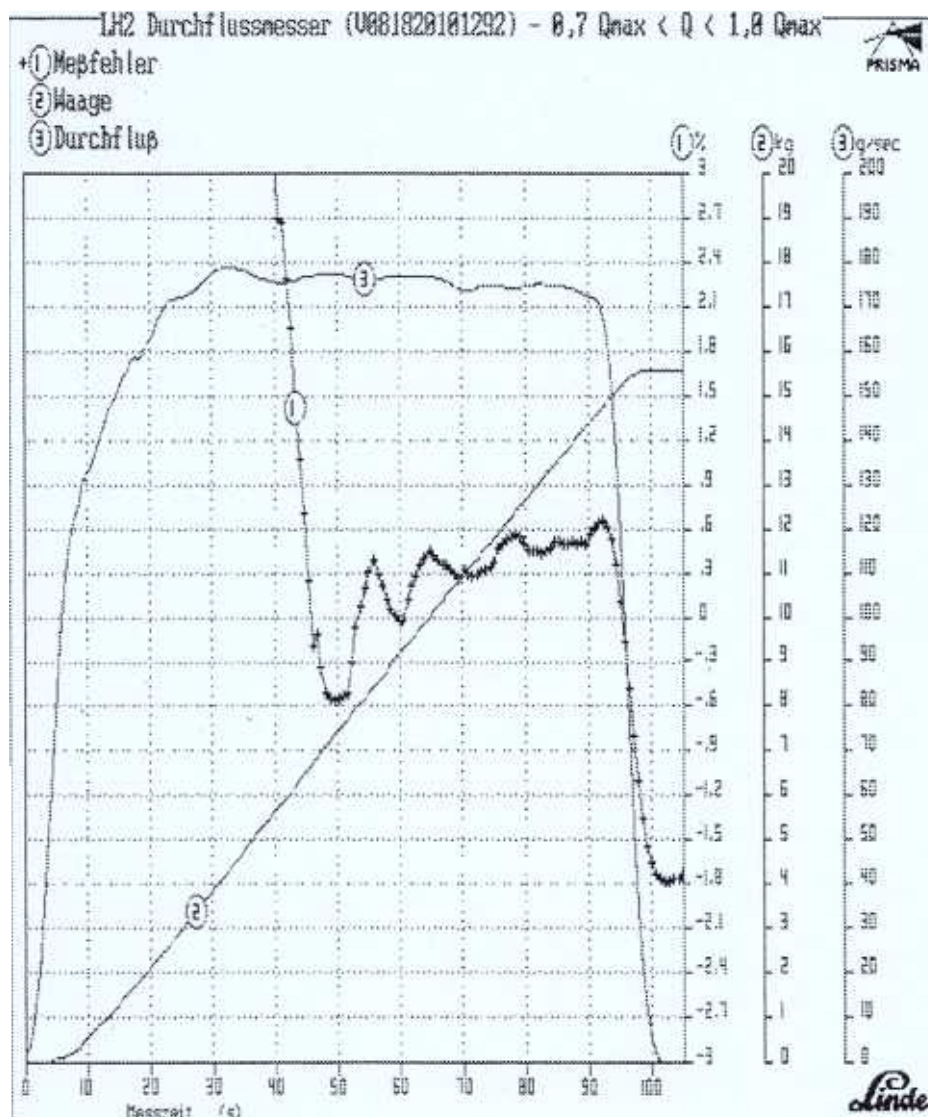


Bild 3 Exemplarische Messung

größeren Mengen sogar im „Fliegenden Start Stop“ gemessen werden darf. In der ersten Fassung des Prototyps konnte die geforderte Meßgenauigkeit nur in den oberen zwei Dritteln des Meßbereichs erreicht werden. Mittlerweile wurden die Probleme mit Wasser statt Wasserstoff analysiert, konstruktive Änderungen an Aufnahme und Rohrleitung vorgenommen und die neue Modifikation des Prototyps mit flüssigem Stickstoff getestet. Die Meßgenauigkeit erfüllt dabei die Anforderungen, was insbesondere die Eignung des Aufnehmers auch für andere kryogene Medien zeigt. Die Vermessung mit flüssigem Wasserstoff steht noch aus.

7. Ausblick

Als Fernziel steht die Bauartzulassung als eichfähiges Mengenmeßgerät im Raum. Bis dahin muß zuerst der gesamte Umfang der von der PTB geforderten Messungen noch einmal mit LH₂ und dem neuen Aufnehmer durchgeführt werden. Als nächstes steht eine Zulassung des Prüfstandes durch die PTB auf dem Programm. Erst dann kann die sogenannte Vorprüfung auf dem Prüfstand erfolgen. Danach wird das Meßgerät nach den entsprechenden Regeln am Aufstellungsort geprüft. Abschließend muß die Durchführung der Wiederholungsprüfungen festge-

legt werden. Angesichts des erheblichen Aufwandes bleibt zu hoffen, daß durch die Ausdehnung des Einsatzes auf andere kryogene Medien später Stückzahlen erreicht werden, die die Wirtschaftlichkeit wiederherstellen.

Literatur

- [1] Giacomazzi, G. and Gretz, J.: Euro-Quebec Hydro-Hydrogen Pilot Project (EQHPP): a challenge to cryogenic technology; *Cryogenics* 1993 Vol. 33 No. 8; pp 767-771
- [2] Tachtler, J. and Szyszka, A.: PKW-Betankung mit Flüssigwasserstoff; *Linde-Berichte aus Technik und Wissenschaft* 1992 Band 68; Seiten 31 - 39
- [3] Braess, H. H. and Regar, K.-N. and Strobl, W.: Drive systems to protect the environment; *Automotive Technology International* 1990; pp 249 - 255
- [4] Belogub, A. V. and Talda, G. B.: Petrol-hydrogen truck with load-carrying capacity 5 tons; *Int. J. Hydrogen Energy* 1991 Vol. 16 No. 6; pp 423 - 426
- [5] Das Vorhaben wurde mit Mitteln des BMFT gefördert.
- [6] Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Abteilung 1: Vorläufige Richtlinie für die meßtechnische Prüfung von Mengenmeßgeräten für flüssige, tiefkalte Gase; Braunschweig 1993
- [7] Industrial Gases Committee: Empfehlungen für die Mengemessung von kryogenen Flüssigkeiten; IGC Document 71761D; Paris 1976
- [8] Formes, A. und Patzelt, A. und Stephan, A.: Isolierung an vakuumisolierten Tieftemperaturkomponenten, *DKV Tagungsbericht* 1989 Band 1, Seiten 95 105