

Transport und Nutzung von flüssigem Wasserstoff: Leitprojekt TransHyDE – Projekt AppLHy!¹⁾

Franziska Fuhry, Holger Neumann, Klaus-Peter Weiss und Michael J. Wolf*

DOI: 10.1002/cite.202400075

 This is an open access article under the terms of the [Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivs](#) License, which permits use and distribution in any medium, provided the original work is properly cited, the use is non-commercial and no modifications or adaptations are made.

Dieser Artikel behandelt Technologien zu Bereitstellung, Speicherung, Transport und Anwendung von flüssigem Wasserstoff (LH₂) und seinem Nutzen für den Aufbau einer Wasserstoff-Transport-Infrastruktur in Deutschland. LH₂ bietet durch seine hohe gravimetrische Energiedichte und intrinsische Reinheit große Potenziale innerhalb einer nachhaltigen Wasserstoffwirtschaft. Zudem entstehen Synergieeffekte zwischen dem tiefkalten LH₂ und Hochtemperatur-Supraleitern (HTS), und auch für andere Prozesse lässt sich die „Kälteleistung“ von LH₂ nutzen.

Schlagwörter: Flüssigwasserstoff, Hybride Pipeline, LH₂ und Supraleitung (HTS), Wasserstoff-Transport-Infrastruktur, Wasserstoff-Verflüssigung

Eingegangen: 01. Juli 2024; revidiert: 07. Dezember 2024; akzeptiert: 12. Dezember 2024

Transport and Use of Liquid Hydrogen: The Flagship Project TransHyDE – Project AppLHy!

The AppLHy! project is part of the TransHyDE flagship project of the Federal Ministry of Education and Research. The researchers are developing various technologies for transport and application of liquid hydrogen and are demonstrating their benefits for the development of a sustainable and efficient hydrogen transport infrastructure in Germany. The focus of AppLHy! is on the supply, storage, and transport of liquid hydrogen (LH₂). This offers great potential within a sustainable hydrogen economy as a potentially CO₂-free vector with high gravimetric energy density and intrinsic purity. In addition, synergy effects between cryogenic LH₂ and high-temperature superconductors (HTS) emerge, and the “cooling power” of LH₂ can also be used for other processes.

Keywords: Hybrid pipeline, Hydrogen liquefaction, Hydrogen transportation infrastructure, LH₂ and superconductivity (HTS), Liquid hydrogen


1 Einleitung

Verschiedene Studien prognostizieren für die Jahre 2045–2050 einen Wasserstoffbedarf zwischen ca. 100 und 900 TWh für Deutschland [1–3]. Ein Teil dieser Importmenge wird dabei voraussichtlich durch Übersee-Importe per Schiff erfolgen. Flüssigwasserstoff kann dabei ein relevanter Import-Vektor sein. Er kann zum Beispiel als Kraftstoff für große und schwer nachhaltig betreibbare mobile Anwendungen wie große LKW, Schiffe oder Flugzeuge eingesetzt werden [4]. Sollte sich LH₂ als Brennstoff für einige dieser Anwendungen durchsetzen, könnten 2045–2050 mehrere Millionen Tonnen LH₂ jährlich in Deutschland benötigt werden.

Flüssigwasserstoff bietet im Vergleich zu anderen Energieträgern verschiedene Vorteile, die sich aus seinen physikalischen Eigenschaften ergeben:

¹Franziska Fuhry, ¹Dr.-Ing. Holger Neumann,

¹Dr. Klaus-Peter Weiss, ¹Dr. Michael J. Wolf

 <https://orcid.org/0000-0001-9080-080X>
(michael.wolf@kit.edu)

¹Institut für Technische Physik, Karlsruher Institut für Technologie, Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, Eggenstein-Leopoldshafen 76344, Deutschland.

¹⁾Dieser Beitrag ist Teil des Themenhefts “Wasserstoff”, *Chem. Ing. Tech.* **2024**, 96 (1–2)

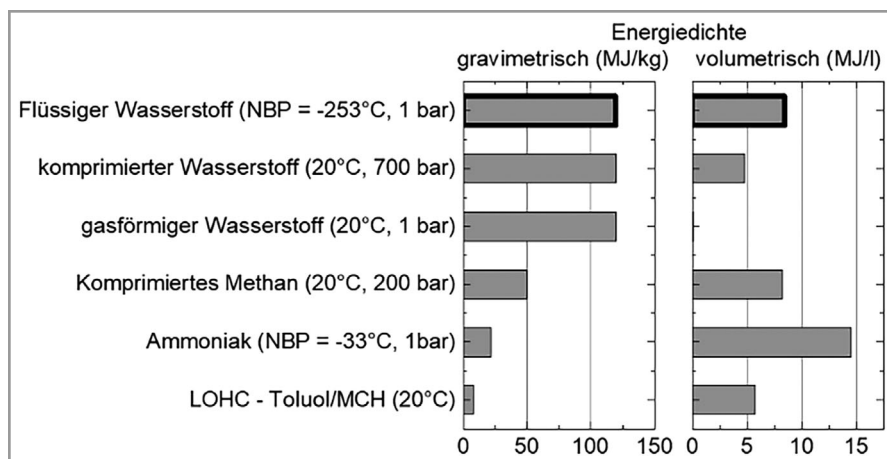


Abbildung 1. Vergleich der gravimetrischen und volumetrischen Energiedichten verschiedener Wasserstoff-Aggregatzustände und Derivate. Datenquellen [5–8].

1.1 CO₂-Freiheit

Sowohl die Herstellung als auch die Verflüssigung des Wasserstoffs erfolgt in der Regel in Ländern, wo ein großes Angebot effizienter und kostengünstiger elektrischer Energie aus erneuerbaren Quellen besteht bzw. aufgebaut werden kann. Hierbei redet man dann von grünem Wasserstoff. Dadurch kann die Verflüssigung kostenoptimiert und im besten Fall treibhausgasneutral durchgeführt werden.

1.2 Hohe Speicherdichte

Flüssigwasserstoff zeichnet sich besonders durch seine sehr hohe gravimetrische (33,3 kWh kg⁻¹) und moderate volumetrische (2,4 kWh L⁻¹) Energiedichte aus. Diese Eigenschaft spielt insbesondere für Energie-Importländer wie Deutschland eine wichtige Rolle. Die hohe Speicherdichte von LH₂ ermöglicht einen effizienten und platzsparenden Transport. Diese Eigenschaft ist zudem für mobile Anwendungen relevant, die mit vergleichsweise kleinen LH₂-Tanks hohe Reichweiten erzielen können. Und auch die Bevorratung in großen Mengen, etwa an Flughäfen, Schiffshäfen und Bahnhöfen, erfordert relativ geringe Tankvolumina. Die Energiedichten verschiedener Wasserstofftransportformen und Wasserstoff-Derivate sind grafisch in Abb. 1 dargestellt; weitergehende Informationen zur LH₂-Speicherung in Kap. 3.

1.3 Großer Dichteunterschied

Aktuell werden Speicher von Flüssigerdgas (LNG) auch zur Stabilisierung der Erdgasnetze verwendet. Dabei wird die Flüssigkeit abhängig von der gerade nachgefragten Gasmenge regasifiziert. Durch den großen Dichteunterschied zwischen Flüssigkeit und Gas (ca. 1:600) entsteht bei der Regasifizierung schnell ein relativ großer Volumenstrom,

der in das Leitungsnetz eingespeist werden kann, um dadurch Schwankungen sehr schnell auszugleichen. Zukünftige Terminals mit Flüssigwasserstoff (Dichteverhältnis ca. 1:842) können dies im Gegensatz zu anderen diskutierten H₂-Varianten sicherstellen.

1.4 Kein Energieaufwand am Ort der Verwendung

Der Energieaufwand für die Verflüssigung des Wasserstoffs fällt ausschließlich am Ort der Erzeugung an (Details siehe Kap. 2). Damit wird neben Wasserstoff indirekt auch Energie importiert. Wird das Regasifizierungsverfahren innovativ gestaltet, lässt sich außerdem die inhärente Tieftemperatur in mechanische und/oder elektrische Leistung umwandeln und ein Teil der Verflüssigungsenergie wieder zurückgewinnen. Alternativ kann auch die Kälteleistung der Tieftemperatur genutzt werden.

1.5 Reifegrad

LH₂ wird seit Jahrzehnten in der Raumfahrt eingesetzt, weshalb die Technik im Vergleich zu anderen flüssigen Speichervarianten einen hohen technologischen Reifegrad aufweist [9]. So ist beispielsweise der Transport von LH₂ auf der Straße in Deutschland bereits etabliert. Aber auch in der Stahl- und Glasproduktion kann LH₂ den schnellen Umstieg von fossilen Energieträgern auf grünen Wasserstoff unterstützen. Zudem laufen erste Pilotprojekte zum Einsatz von LH₂ im interkontinentalen Schiffstransport und der Luftfahrt [10]. Eine wesentliche Herausforderung besteht in der Skalierung der Anlagen und Komponenten für die zur Energieversorgung benötigten Mengen und im Aufbau der Infrastruktur.

1.6 Direkte Verwendbarkeit

LH₂ benötigt keine Reformierung oder Verfahren zur Freisetzung von Wasserstoff am Einsatzort, wie etwa H₂-Derivate. Es kann direkt verwendet werden, indem es mit Umgebungswärme verdampft wird. Dies ist insbesondere in mobilen Anwendungen mit begrenztem Platzangebot vorteilhaft.

1.7 Reinheit

Wird Wasserstoffgas aus einem LH₂-Speicher entnommen, erreicht es extrem hohe Reinheit (99,9999 % und besser). Dadurch entfallen beim Einsatz von LH₂ als

Wasserstoffquelle weitere Reinigungsprozesse um z. B. die für Brennstoffzellen benötigte Gasqualität zu erreichen. Aus diesem Grund wird Wasserstoffgas aus LH_2 bereits heute umfassend in der Halbleiterindustrie eingesetzt. Anwendungsbeispiele sind etwa die Wärmebehandlung von Silizium-Wafern, die Herstellung einkristalliner Schichten, die Ionenimplantation in Halbleiterschichten, die Haltbarkeits-Verlängerung von Chemikalien oder EUV-Lithographie [11, 12].

1.8 Kälteleistung

Wasserstoffgas verflüssigt sich erst bei einer Temperatur von 20 K (-253°C). Diese kryogenen Temperaturen eröffnen neue technologische Möglichkeiten, beispielsweise durch die Kombination mit supraleitenden Kabeln oder Bauteilen (siehe Kap. 8). Außerdem stellt die Kälte des Wasserstoffs selbst einen Mehrwert dar, wenn man sie an konventionelle Anwendungen koppelt und auf diese Weise den Energiebedarf z. B. für Prozesskälte reduziert.

Neben den Vorteilen bestehen beim Einsatz von Flüssig-Wasserstoff auch Herausforderungen. Auf einige technische Aspekte wird in den folgenden Kapiteln hingewiesen. Wesentliche Punkte der Wasserstoff-Sicherheit [50] und Normung [51] sind jedoch in anderen Beiträgen vertieft beschrieben, weswegen hier auf [50, 51] verwiesen wird.

2 Verflüssigung von Wasserstoff

Der theoretische Mindestenergieaufwand für die Verflüssigung von Wasserstoff beträgt $14,2 \text{ MJ kg}^{-1}$ oder 11,8 % des Heizwerts der entsprechenden Wasserstoffmenge. Dabei sind die Kernspin-Allotrope des Wasserstoffs zu beachten: Während Normalwasserstoff bei Raumtemperatur aus 75 % ortho- H_2 und 25 % para- H_2 besteht, verschiebt sich das Gleichgewicht mit abnehmender Temperatur zunehmend in Richtung Parawasserstoff, bis Flüssigwasserstoff bei 20 K zu 99,8 % in der para-Konfiguration vorliegt. Die ortho-para-Umwandlung ist ein exothermer Prozess, daher erfolgt die Abkühlung idealerweise entlang der o-p-Gleichgewichtslinie.

Aktuelle Verflüssiger setzen Eisenoxid (Fe_2O_3) als Katalysatormaterial ein. Dieses wird entweder zwischen den einzelnen Wärmeübertragern in separaten Behältern platziert oder direkt in den jeweiligen Strömungskanal der Wärmeübertragerblöcke eingefüllt. Letztere Vorgehensweise ist thermodynamisch günstiger, da die Abkühlung des Wasserstoff-Massenstroms kontinuierlich statt in Sprüngen erfolgt [13]. Aktuelle Verflüssiger, die diesem Modell folgen, sind aus diesem Grunde effizienter, auch wenn dafür größere Coldbox-Volumina nötig sind. Die Ortho-Para-Umwandlung ist in [52] im Detail behandelt.

Bisher sind weltweit einige Dutzend größere LH_2 -Verflüssigungsanlagen in Betrieb. Aktuell ist ein starker

Ausbau der Kapazitäten projektiert [14, 15] bzw. realisiert, wobei auch immer größere Anlagen (z. B. 90 Tonnen pro Tag in Korea [16]) geplant und gebaut werden. Vergleicht man diese Mengen mit den allein für Deutschland bis 2045 prognostizierten Wasserstoff-Bedarfen im Bereich von Millionen Tonnen pro Jahr, so sieht man, dass – selbst wenn nur ein kleiner Teil der Wasserstoff-Gesamtmenge verflüssigt wird – eine weitere Vergrößerung der Anlagen in Kapazität und Anzahl benötigt werden wird. Die verschiedenen Verflüssiger-Konzepte eignen sich abhängig von ihren Konfigurationen jeweils für unterschiedliche Anwendungsgebiete:

2.1 Kleinanlagen (0,25 bis 3,4 tpd)

Diese eignen sich besonders für Forschungszentren oder industrielle Anwendungen, wenn nur überschaubare Mengen LH_2 benötigt werden, die Verflüssiger nur phasenweise in Betrieb sind oder niedrige Investitionskosten wichtiger sind als hohe Effizienz. Gearbeitet wird hier typischerweise mit einem Kältekreislauf mit Helium als Kältemittel, ölgeschmierten Schraubenkompressoren, einem H_2 -Einlassdruck von 10–25 bar sowie einer Stickstoff-Vorkühlung (etwa 0,4 L LN_2 -Bedarf pro Liter LH_2). Dies erlaubt den Einsatz vergleichsweise unkomplizierter und erprobter Technologie bei eher geringen Sicherheitsanforderungen. Der spezifische Energiebedarf solcher Kleinverflüssiger ist allerdings mit etwa $44\text{--}48 \text{ MJ kg}^{-1}$ vergleichsweise hoch [17].

Eine auf diesem Prinzip basierende Wasserstoff-Verflüssigungsanlage wurde am KIT konzipiert. Sie besteht im Wesentlichen aus einem Wasserstoff-Gastank (GH_2 -Tank bei 45 bar), aus dem der Wasserstoff entnommen und in Wärmeübertragern auf Kondensationstemperatur abgekühlt wird. Für die Abkühlung im ersten Wärmeübertrager (WÜ I), in dem der Wasserstoff von Raumtemperatur (300 K) auf 80 K abgekühlt wird, kommt flüssiger Stickstoff (LN_2) zum Einsatz. Für die Abkühlung des Wasserstoffes von 80 auf ca. 17 K in weiteren Wärmeübertragern steht eine vorhandene He-Tiefteplanturanlage zur Verfügung; hier findet auch die ortho-para-Umwandlung statt. Im Anschluss wird der tiefkalte Wasserstoffmassenstrom mit einem Joule-Thompson-Ventil entspannt und in einen Flüssig-Wasserstoff-Speichertank verflüssigt. Der nicht verflüssigte Anteil sowie abdampfender Wasserstoff des LH_2 -Speicherbehälters werden aufgewärmt und durch einen Kompressor wieder dem Wasserstoff-Gastank zugeführt. Aus dem Flüssig-Wasserstoff-Tank ist eine Befüllung mobiler Flüssig-Wasserstofftransportbehälter zur Versorgung von z. B. materialwissenschaftlichen Experimenten vorgesehen. Abb. 2 zeigt ein Schema des geplanten Verflüssigers. Tab. 1 gibt einen Überblick über dessen Designdaten.

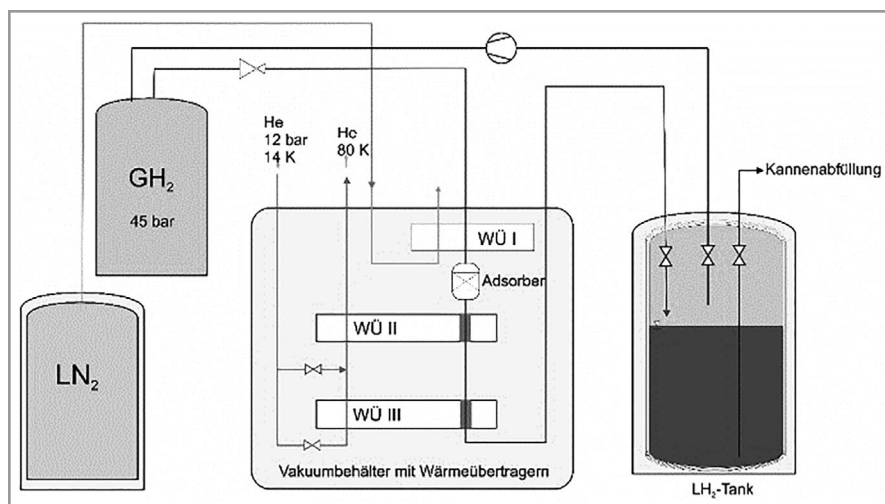


Abbildung 2. Vereinfachtes Schema des am KIT konzipierten H₂-Verflüssigers.

2.2 Mittelgroße Anlagen (5 bis 35 tpd)

Solche Anlagen kommen vor allem in industriellen Kontexten zum Einsatz. Beispielsweise verfügt eine Anlage der Firma Linde in Leuna [18] über drei ölgelagerte Expansionsturbinen und einen kalten Ejektor. Die Verdichtung erfolgt zweistufig mit einem Feed-Eingangsdruck von 24 bar. Der spezifische Energiebedarf dieses Verflüssigers konnte auf etwa 34 MJ kg⁻¹ verbessert werden, was etwa 28 % des Heizwerts von Wasserstoff entspricht. Da die Kaltfahrzeit typischerweise mehrere Tage dauert, sollten Anlagen dieser Größe optimalerweise im Dauerbetrieb am Bestpunkt betrieben werden.

2.3 Aktuelle Konzepte für Großanlagen zur Wasserstoffverflüssigung (50 bis 200 tpd)

Großanlagen konzentrieren sich auf die Betriebskosten, wobei hocheffiziente Kreisläufe und Komponenten realisiert werden sollen. Studien schätzen den zu erwartenden spezifischen Energiebedarf auf 24 MJ kg⁻¹ (etwa 20 % des

Tabelle 1. Design-Parameter des am KIT konzipierten H₂-Verflüssigers.

Wasserstoff-Verflüssigungsrate	2,9 g s ⁻¹ = 149 L _{LH2} h ⁻¹
Flüssig-Stickstoff-Massenstrom in WÜ I	24 g s ⁻¹
Helium-Massenstrom (14–80 K)	10 g s ⁻¹
Wasserstoff-Eingangsdruck	2,5 MPa
Parameter überkritischer Wasserstoff vor J-T-Ventil	$P = 2,5 \text{ MPa}$, $T = 17 \text{ K}$
Volumen LH ₂ -Speichertank	2000 L

Heizwerts) [19]. Abb. 3 zeigt dabei die angestrebte Effizienz-Steigerung der Verflüssigung bei größerer Kapazität der Anlage.

3 Speicherung

Die Technologie zur Speicherung flüssigen Wasserstoffs ist gut entwickelt. An größeren Verflüssigungsanlagen werden typischerweise sphärische Dewar-Behälter mit einem Volumen von ca. 1000 m³ verwendet. Die größten existierenden Flüssigwasserstoffspeicher dieser Art (bis zu 5000 m³ Volumen) stellen an den Weltraumbahnhöfen LH₂ als Raketentreibstoff bereit. Im Isolationsraum zwischen Innen- und

Außentank befindet sich dabei eine evakuierte Perlit- oder Hohlglaskugelschüttung.

Die relative Abdampftrate skaliert dabei sehr stark mit der Tankgröße, da der Tankinhalt kubisch, die Tankoberfläche jedoch quadratisch skaliert, siehe Abb. 4 [20–24]. Aktuell laufen Studien zu Behältern mit einer Größe von bis zu 100 000 m³ [25]. An kleineren Verflüssigungsanlagen oder bei LH₂-Verbrauchern kommen auch zylindrische Dewar-Behälter mit einem Volumen von bis zu 500 m³ zum Einsatz, die zur besseren Raumnutzung auch vertikal ausgeführt sein können.

Beim Transfer des flüssigen Wasserstoffs vom Trailer zum statischen Speicher entstehen Verluste, etwa durch das verdrängte Kaltgas im Empfängerdewar, Verdampfungsverluste beim anfänglichen Einkühlen von Transferleitungen und Armaturen, sowie durch unvollkommene thermische Isolation oder Flash-Gas beim Entspannen der Flüssigkeit auf niedrigeren Druck. Diese werden häufig zusammen als Boil-Off-Gas bezeichnet. In Messungen von Partridge lag die Summe dieser Verluste bei etwa 13 % [26].

Gegenstand der aktuellen Forschung sind daher Tanksysteme mit integrierten Rückverflüssigungsanlagen, welche solche Verluste minimieren sollen. Zuletzt stellten Fesmire et al. [27] einen sogenannten Zero-boil-off-Speicher vor. Dieser konnte nicht nur den unvermeidlichen Wärmeeintrag kompensieren, sondern den gespeicherten Wasserstoff sogar auf 15 K unterkühlen. Diese Installation wird auch durch die damit verbundene Dichteerhöhung des Wasserstoffs als ökonomisch positiv bewertet. Die NASA schätzt, dass mittels dieser Technologie je Dollar für die notwendige Kälteleistung etwa Wasserstoffverluste mit fünf Dollar Gegenwert verhindert werden können [28]. Zudem wurden bereits Zero-loss Transfer-Aktionen demonstriert, bei denen jeglicher Flashgasverlust während der Überfüllvorgänge vermieden wurde.

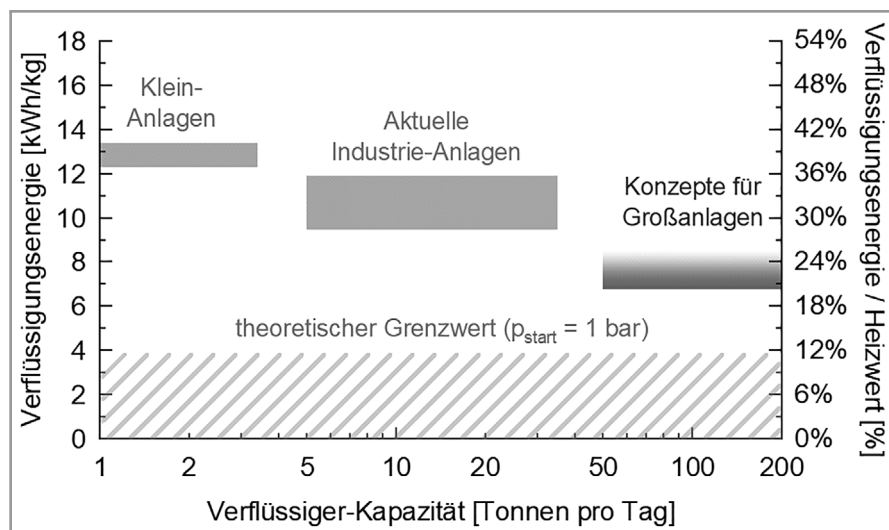


Abbildung 3. Zusammenhang zwischen der benötigten Energie pro Kilogramm zu verflüssigendem Wasserstoff und der Kapazität des eingesetzten Verflüssigers für die drei vorgestellten Gruppen. Der theoretische Grenzwert von 11,8 % der Heizleistung gibt die Untergrenze für Optimierungsspielräume bei Großanlagen vor.

4 Transport

Eine globale Wasserstoffwirtschaft muss die geographischen, politischen und wirtschaftlichen Bedingungen in den H_2 -Verbrauchs- und -Erzeugungsregionen miteinbeziehen. Diese beeinflussen unmittelbar die Wahl des jeweiligen Transportsystems:

4.1 Interkontinentaler, maritimer Transport

Für große Entfernungen (4000 bis 15 000 km) orientiert sich die Wahl des H_2 -Transportsystems in erster Linie an der Speicherdichte und den spezifischen Transportkosten.

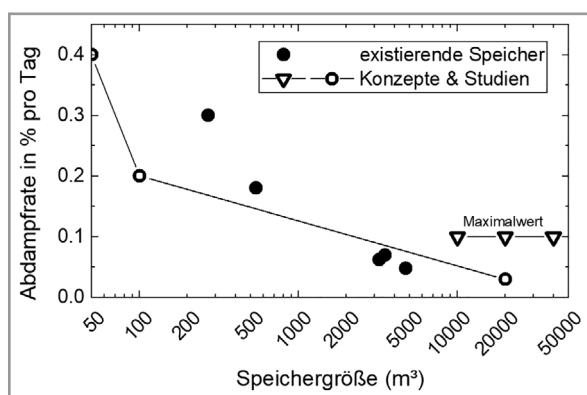


Abbildung 4. Abhängigkeit der Verdampfungsverluste pro Tag in Abhängigkeit vom Speichervolumen des verwendeten Tanks: Die prozentualen Verluste sinken mit größeren Speichervolumina.

Es wird voraussichtlich ein Teil des Wasserstoffbedarfs Deutschland in Zukunft durch Übersee-Importe per Schiff erreichen.

Die Umsetzbarkeit des Transports von Wasserstoff in flüssiger Form zeigt das Pilotprojekt HESC [29] (Hydrogen Energy Supply Chain): Weltweit erstmalig wurde dafür LH_2 in größeren Mengen produziert, gespeichert, über 9000 km sicher transportiert und am Zielort verwertet. Die erste Schiffladung Flüssigwasserstoff aus Port Hastings in Australien erreichte Kobe in Japan im Jahr 2022. Aktuell ist ein LH_2 -Tanker mit einem Flüssigwasserstoffinventar von 160 000 m^3 bzw. etwa 10 640 t und einer geplanten Abdampftrate von etwa 0,2 % pro Tag angekündigt [30].

4.2 Europäischer, überregionaler Transport

Besonders günstig ist die H_2 -Produktion in Regionen mit großen Potenzialen erneuerbarer Energien, z. B. Windenergieanlagen offshore aber auch an den Atlantik-, Nord- und Ostseeküsten sowie in flächenreichen Regionen Südeuropas, z. B. per Photovoltaik [35]. Die Vorbereitungen für den Aufbau eines Pipelinenetzes für gasförmigen Wasserstoff laufen, dabei können teilweise Erdgaspipelines umgewidmet werden [31]. Bis Pipeline-Ausbauziele erreicht sind, spielt der Transport von LH_2 über die Straße, ggf. auch zukünftig über die Schiene oder Binnenwasserwege eine ergänzende Rolle bei der Deckung entsprechender Wasserstoffbedarfe von nicht an ein H_2 -Gasnetz angeschlossenen Verbrauchern. Für Abnehmer mit kontinuierlich hohem LH_2 -Bedarf, wie zum Beispiel Flughäfen, könnten auch Flüssigwasserstoff-Pipelines sinnvoll sein, um Umwandlungsverluste zu minimieren und die inhärente Kälte der Flüssigkeit nutzbar zu machen [32, 33]. LH_2 -Pipelines werden bereits zur Betankung von Raketen [34] oder innerhalb von industriellen Verflüssigungsanlagen eingesetzt.

4.3 Behältergebundener, regionaler LH_2 -Transport und Distribution

Für die behältergebundene Distribution innerhalb Deutschlands identifizieren aktuelle Studien verschiedene technisch und ökonomisch sinnvolle Szenarien. Zum Beispiel schätzen Busch et al. die Versorgung deutscher Flughäfen mit LH_2 über Schienentransport als besonders günstig ein [36]. Reuß et al. kommen zu dem Schluss, dass die Kosten für den Transport von Flüssigwasserstoff über die Straße ab einer

Entfernung von 130 km geringer sind als die von gasförmigem Wasserstoff oder LOHC [37]. Die dafür verwendeten Flüssigwasserstofftrailer haben typischerweise ein Speichervolumen von bis zu 70 m³ und verwenden Arbeitsdrücke zwischen 1 und 4 bar(a), Superisolation (Multilagenisolation im Hochvakuum), sowie teilweise eine LN₂-Schildkühlung [38]. Der unvermeidliche Restwärmeeintrag resultiert in einem langsamen Druckaufbau. Stratifikationseffekte treten dagegen beim Straßentransport so gut wie nicht auf. Die Befüllzeit eines solchen LH₂-Trailers beträgt vier bis sechs Stunden, die Entnahmedauer bis zu zwei Stunden.

5 LH₂-Importterminals

Für den interkontinentalen Transport von LH₂ werden landseitig Terminals zur Entladung, Speicherung und zum Weitertransport des angelieferten Wasserstoffs benötigt. Der größte Unterschied zu LNG-Terminals besteht darin, dass alle LH₂-führenden Komponenten zwingend mit einer Vakuumisolation versehen sein müssen, da die Siedetemperatur bei LH₂ unter der der Hauptbestandteile der Luft liegen, bei LNG jedoch darüber. Über eine sogenannte Jetty-Line von bis zu 1 km Länge wird Flüssigwasserstoff an Land und gasförmiger Wasserstoff zurück in den Tank transferiert. Verglichen mit LNG-Terminals besteht erheblicher Skalierungsbedarf der benötigten Komponenten (vom LH₂-Schiff bis zum LH₂-Tank), um die eingangs diskutierten Wasserstoff-Mengen importieren zu können.

6 Pumpen

Für die Herstellung, den Transport und die Verwendung von kryogenem, flüssigem Wasserstoff als Energieträger sind zahlreiche Umfüllvorgänge notwendig [39]. Man unterscheidet zwischen folgenden Pumpensystemen, welche sich für verschiedene Anwendungsfelder anbieten:

- *LH₂-Hochdruckpumpen* bringen eher geringe Massenströme (100 kg h⁻¹) auf einen hohen Druck von 350 bis 700 bar. Wird diese Flüssigkeit nun erwärmt, entsteht Hochdruckgas, welches in Tankbehälter, etwa für Straßenfahrzeuge, umgefüllt werden kann. LH₂-Hochdruckpumpen sind als Kolbenpumpen am Markt verfügbar und werden bereits vielfach eingesetzt.
- *LH₂-Druckaufbaupumpen* überbrücken Unterschiede zwischen dem Druck im LH₂-Tank und dem Mindesteingangsdruck beim Verbraucher. In der Regel beschränkt sich die Druckerhöhung auf einige bar bei einem Förderstrom im Bereich bis 500 kg h⁻¹. Für LH₂-Druckaufbaupumpen kommen primär Kolbenpumpen sowie je nach Anwendungsfall auch Kreiselpumpen infrage. Druckaufbaupumpen für LH₂ sind teilweise am Markt erhältlich, jedoch besteht für viele Spezifikationen noch Entwicklungsbedarf.

- *LH₂-Transferpumpen* bewegen große Förderströme von bis zu 10 t h⁻¹ bei einem nur geringen Druckaufbau von 5 bar, welcher hauptsächlich die Druckverluste in den Rohrleitungen überwinden soll. Die dafür verwendeten Kreiselpumpen finden Einsatzmöglichkeiten etwa bei der Betankung von Schiffen, Flugzeugen oder Lokomotiven, sowie in der Distribution von Flüssigwasserstoff von Import-Terminals zum Verbraucher. LH₂-Kreiselpumpen dieser Größe wurden bisher nur als Prototypen eingesetzt. Ein Forschungsschwerpunkt liegt deshalb auf der Entwicklung effizienter Pumpensysteme, die speziell auf LH₂ als Fördermedium ausgelegt sind.

Pumpen für flüssige Kryogene sind ungewöhnlich, da der Wärmeeinfall von der Umgebung auf das Kryogen minimiert werden soll. Ein Risiko, dass es dabei zu vermeiden gilt, sind Ausfrierungen auf der Umgebungsseite. Bei unsachgemäßer Handhabung können sonst Personen- oder Materialschäden entstehen. Aktuelle Lösungskonzepte umfassen beispielsweise Vakuumisolierung in Verbindung mit Superisolation, große Wärmeleitlängen und der Einsatz schlecht wärmeleitender Materialien. Derzeit gibt es weltweit mehrere Hersteller, die sich auf solche Pumpen spezialisiert haben, sodass die Technologie als etabliert angesehen werden kann. Zudem gibt es Forschungsarbeiten und Neuentwicklungen zu LH₂-Pumpen, beispielsweise im TransHyDE-Projekt AppLHy! [49].

Eine Besonderheit stellen Pumpensysteme dar, die als kryogene Tauchpumpen ausgelegt sind. Solche Druckaufbau- oder Transferpumpen befinden sich innerhalb des LH₂-Reservoirs. Die kryogene Temperatur bietet dabei neben lösbaren technologischen Herausforderungen (wie z. B. Lebensdaueranalyse und Sicherheit gekoppelt an Design und Materialauswahl; siehe Kap. 9) einen enormen Vorteil: die Möglichkeit zur Verwendung supraleitender Bauelemente unter Nutzung der Kühlung durch den ohnehin vorhandenen flüssigen Wasserstoff. Ein in der Pumpe eingesetztes supraleitendes Magnetlager wird bei Abkühlung im Inneren des Zielbehälters aktiviert und hält den Rotor dauerhaft in der Schwebe. Damit können hohe Rotationsgeschwindigkeiten und Lastaufnahmen des Rotors realisiert und auf eine aktive Regelung verzichtet werden. Weiterhin können auch beim Antrieb der Pumpe supraleitende Spulen und Käfigläufer-Systeme eingesetzt werden, was den Wirkungsgrad der LH₂-Pumpen insgesamt erhöht. Diese Pumpentechnologien ermöglichen hocheffiziente Umfüllvorgänge beim Transport sowie die Bereitstellung unterschiedlicher Verbraucherdrücke für zahlreiche LH₂-Transfer- und Anwendungsszenarien.

7 Nutzung von LH₂ in mobilen Anwendungen

Für mobile Anwendungen bietet die hohe Speicherdichte des flüssigen Wasserstoffs einen Vorteil. Der importierte Flüssigzustand des Wasserstoffs sollte innerhalb der

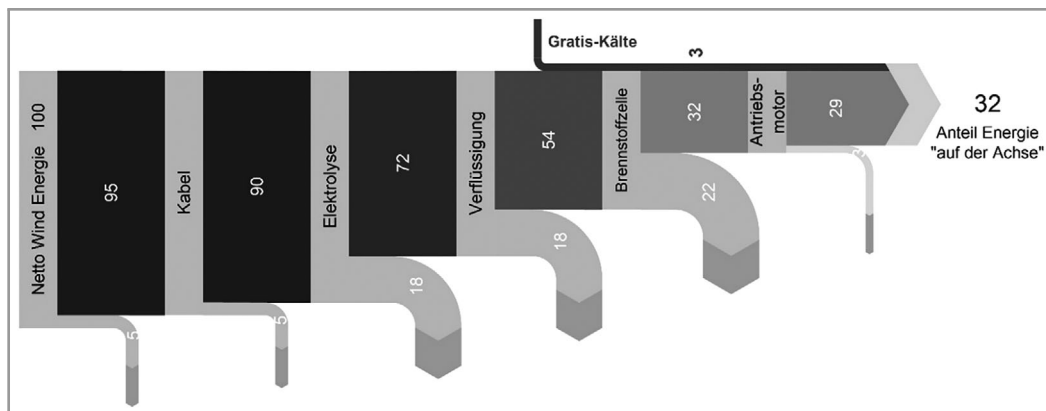


Abbildung 5. Energiekette vom Rohstoff bis zur Antriebsachse für ein mit Flüssig-Wasserstoff betanktes Fahrzeug.

Transportkette möglichst bis zur mobilen Endanwendung erhalten bleiben, um eine energieaufwendige Verflüssigung am Ort der Verwendung zu vermeiden.

Zu mobilen Anwendungen, für die Wasserstoff als Brennstoff in Betracht kommt, gehören: Bergbau- und Baufahrzeuge, Lokomotiven für Passagierzüge sowie den Gütertransport, Schiffe, Flugzeuge und LKW, sowie PKW und Busse. Insbesondere für größere Maschinen mit über 500 kg Wasserstoff-Bedarf eignen sich bevorzugt Flüssigwasserstofftanks (Baufahrzeuge, Lokomotiven, Schiffe und Flugzeuge).

Im Vergleich zu anderen Brennstoffen lohnt sich ein Blick auf die Effizienz der Energieketten vom Rohstoff bis zum Antriebsstrang: Fossile Energieketten wurden im Lauf der letzten Jahrzehnte immer ineffizienter, da der Aufwand für die Exploration und den Transport deutlich gestiegen ist. Aktuell erreicht zudem nur etwa 18–33 % der im Rohöl gespeicherten Energie die Antriebsachse der Fahrzeuge. Wasserstoff umgeht diese logistischen Schwierigkeiten, verbrennt CO₂-neutral und erreicht gleichzeitig als Brennmittel ähnliche Wirkungsgrade: 27–28 % des Energiegehaltes von komprimiertem H₂-Gas entfallen auf die Antriebsseite. Bei flüssigem Wasserstoff sind es ohne weitere Systemverbesserungen sogar 29 %, unter Annahme einer idealisierten instantanen, lokalen H₂-Erzeugung und Verflüssigung an der Tankstelle, d. h. ohne Betrachtung von Transport- und Lager- und Betankungsaufwänden. Drei zusätzliche Prozentpunkte, die aus der Kälteleistung der Flüssigkeit stammen, können potenziell Kühltechnik für den elektrischen Antriebsstrang ersetzen und die nutzbare Energie auf 32 % des initialen Energiebudgets erhöhen (Abb. 5) [40].

Aktuell stehen zwei technische Umsetzungen für wasserstoffbasierte Antriebe in mobilen Anwendungen zur Auswahl: Zum einen ein Brennstoffzellenantrieb in Kombination mit einem Elektromotor, zum anderen die Möglichkeit, den Wasserstoff in einem Wasserstoffhubkolbenmotor zu verbrennen.

Für eine hohe Effizienz des Antriebsstrangs in elektrischen Fahrzeugen ist eine fortschrittliche Kühlstrategie wichtig. Der Einsatz von LH₂ kann diesen technischen Aufwand deutlich reduzieren, indem der Wasserstoff vor dem Einsatz in der Brennstoffzelle Wärmeenergie (ca. 1,24 kWh kg⁻¹) aufnimmt. Rein rechnerisch bräuchte ein LH₂-betriebener LKW demnach keine dedizierten Kühlsysteme für den Antriebsstrang mehr. Zur Optimierung des Gesamtsystems besteht jedoch noch Forschungsbedarf.

Wesentlich für eine Durchdringung der H₂-getriebenen Fahrzeuge ist eine Tankstellen-Infrastruktur. Die meisten Tankstellen befinden sich in Japan, Deutschland, China und den USA. Um Fahrzeuge an Tankstellen mit Hochdruckwasserstoff zu betanken, gibt es im Großen und Ganzen zwei Möglichkeiten: (i) Der Wasserstoff wird flüssig geliefert und in einem Flüssigwasserstofftank direkt an der Tankstelle gespeichert; (ii) gasförmiger Wasserstoff wird in einem ionischen Verdichter komprimiert. Beide Konzepte sind relativ wartungsaufwändig. Allerdings ist die Speicherung in flüssiger Form durch die größere volumetrische Energiedichte deutlich platzsparender.

8 LH₂ und Supraleitung

Der Einsatz supraleitender Materialien eröffnet Raum für technischen Fortschritt in vielen verschiedenen Anwendungsgebieten, wie etwa Energie- und Medizintechnik. Vorteile von supraleitenden Kabeln gegenüber konventionellen Lösungen sind unter anderem der geringere Raumbedarf für die Trassenführung, geringere elektrische Verluste, höhere Leistungsdichten und die Möglichkeit, durch höhere Ströme eine vorgegebene Leistung auf einem geringeren Spannungsniveau zu übertragen [41]. Um den supraleitenden Zustand aufrechtzuerhalten, muss das Kabel jedoch unter die Sprungtemperatur des Supraleiters abgekühlt und bei dieser Temperatur gehalten werden. Beim Einsatz von flüssigem Wasserstoff mit Temperaturen von ca. 20–25 K

wird dieses Temperaturniveau quasi ohne Mehraufwand mitgeliefert. Kombiniert man also den Transport von chemischer Energie in einer LH_2 -Pipeline mit dem besonders effizienten Transport von Strom in einem Supraleiter zu einer hybriden Pipeline, hat das verschiedene synergetische Effekte. Besonders vorteilhaft ist diese Trassenbündelung für Regionen mit dichter Bebauung oder hohem Durchleitungsbedarf.

In ersten Demonstratoren wurden 2013–2015 unter Einsatz des Supraleiters MgB_2 kombinierte Übertragungsleistungen von elektrischer Energie und Flüssigwasserstoff im Bereich von je ca. 50–75 MW erreicht [42]. Zudem wurden erste supraleitende DC- und AC-Kabel mit Flüssigstickstoff-Kühlung erfolgreich entwickelt und im Netz betrieben. Ein aktuelles AC-Kabelprojekt ist das 2020 begonnene Projekt SuperLink in München [43]. Fortschritte bei der Herstellung des Supraleiters REBCO [44] machen dieses Material auch für Anwendungen in der hybriden Energieübertragung interessant.

Dabei machen die Kosten für den Supraleiter einen erheblichen Teil der Investitionen in supraleitenden Kabelprojekten dar. Ebenso wie fehlende langjährige Betriebserfahrung stellt dies eine Hürde für den weitverbreiteten Einsatz von HTS Kabeln in der Energietechnik dar.

Folgende Beispielrechnung für eine 10 km lange hybride Pipeline mit einer Nennübertragungsleistung von je 200 MW chemischer Energie (LH_2 Pipeline) und elektrischer Energie (supraleitendes HTS DC Kabel) dient zur Verdeutlichung für das Konzept der hybriden Pipeline. Es wird dabei von einer konzentrisch aufgebauten Pipeline ausgegangen und es werden folgende Annahmen getroffen: Die Design-Temperatur des Supraleiters sei 25 K, es wird eine Nennspannung von ± 10 kV und eine Nennstromstärke von 10 kA angenommen. Aus Daten zur temperatur- und magnetfeldabhängigen Stromtragfähigkeit des Supraleiters lassen sich in Frage kommende Anordnungen bestimmen. Dabei wird der Supraleiter entsprechend des gewählten konzentrischen Designs als ringförmige Schicht angeordnet. Aus dem vorgegebenen Spannungsniveau und z. B. materialspezifischen Annahmen bzgl. der Durchschlagsfestigkeit verschiedener Dielektrika lässt sich die Dicke der elektrischen Isolation berechnen.

Neben dem Normalbetrieb liefert insbesondere die Betrachtung von elektrischen Kurzschlüssen Anforderungen an das Kabeldesign. Bei einem Kurzschluss kann die Stromstärke für Bruchteile von Sekunden auf ein Vielfaches des Nennstroms ansteigen. Dabei wird der Supraleiter normalleitend und erzeugt eine Verlustleistung, die zur Erwärmung führt. Um den normalleitenden Widerstand zu reduzieren und die Temperatur zu begrenzen, wird zusätzliches Kupfer ins Kabel integriert. Ein weiteres zu betrachtendes Szenario ist der sogenannte „Quench“ des Supraleiters. Falls der Supraleiter z. B. durch eine Wärmequelle lokal erwärmt wird, führt die dort reduzierte Stromtragfähigkeit des Supraleiters zu zusätzlicher Verlustleistung und in Folge dazu, dass die Temperatur weiter

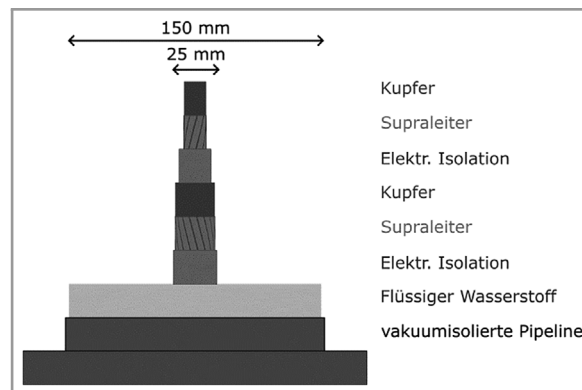


Abbildung 6. Schematischer Querschnitt einer hybriden Pipeline mit synergetischem Transport von LH_2 und Strom in einem supraleitenden Kabel. Der tiefkalte Flüssigwasserstoff macht eine separate Kühlung des Supraleiters unnötig.

ansteigt. Diese Abfolge kann sich selbst verstärken und zur thermischen Beschädigung bis hin zum Durchbrennen des supraleitenden Kabels führen und muss daher ebenfalls im Design betrachtet und bewertet werden.

Abschließend wird nun die Wasserstoffströmung als konzentrische Ringströmung um das supraleitende Kabel berechnet. Im Beispiel wird am Pipelineeingang die Strömung von $1,67 \text{ kg s}^{-1}$ (entspr. 200 MW) unterkühltem flüssigen Wasserstoff bei Temperaturen im Bereich von 21–23,5 K und einem Druck von 3–4 bar(a) angenommen. Dabei spielt die Qualität der thermischen Isolation eine entscheidende Rolle für den Temperaturanstieg; typische Wärmeeinträge liegen bei einstelligen Werten von W m^{-2} . Abb. 6 zeigt schematisch den Schnitt durch die betrachtete hybride Pipeline. Es ergibt sich für den Parametersatz ein Durchmesser des supraleitenden Kabels von ca. 25 mm und für die LH_2 -führende Pipeline von 150 mm.

Die weitere Entwicklung und der Test einer hybriden Pipeline und ihrer Komponenten in einer Demonstrator-Umgebung sowie die Bewertung des Einsatzes sind Gegenstand aktueller Forschungen des KIT innerhalb des TransHyDE-Projekts AppLHy!

In verschiedenen Demonstratoren wurde zudem die überlegene Effizienz von elektrischen rotierenden Maschinen basierend auf Hochtemperatursupraleitern (HTS) gezeigt, etwa bei Generatoren, Schiffsmotoren und elektrischen Antriebsmaschinen von Flugzeugen. Die Nutzung der elektromagnetischen Vorteile von HTS ermöglicht dabei die Konstruktion besonders effizienter und kompakter rotierender Maschinen. Wird zur Abkühlung der Maschinen der Treibstoff LH_2 verwendet, ist keine weitere Kühltechnik erforderlich und die Verluste können gegenüber konventionellen Maschinen um mehr als 80 % reduziert werden. Berechnungen ergeben, dass die Leistungsdichte des e-Motors eines Honda Accords unter dem Einsatz von HTS bei ansonsten gleichen Betriebsdaten verzehnfacht werden kann [40].

9 Materialaspekte für Tieftemperatur-Wasserstoffumgebungen

Ein besonderer Forschungsschwerpunkt von AppLHy! liegt auf der Charakterisierung relevanter Funktions- und Strukturmaterialien für den Einsatz in Flüssigwasserstoff-Anwendungen. Es existieren bereits umfassend charakterisierte Struktur- und Funktionsmaterialien für den Einsatz in tiefkalter Temperatur, allerdings nicht in diesem Umfang für den Einsatz in Flüssigwasserstoff. Bei solchen Anwendungen ist es unabdingbar, die Kompatibilität der zu verwendenden Materialien hinsichtlich Wasserstoffkontakt zu prüfen. Ein wesentlicher Parameter ist hier die Beeinflussung der mechanischen Eigenschaften metallischer Komponenten hinsichtlich Bruch- und Ermüdungsverhalten unter Wasserstoffexposition sowohl im kryogenen Umfeld als auch im Notfall unter den hohen Temperaturen eines Wasserstoffbrands. Aktuell werden häufig Metalllegierungen und faserverstärkte Verbundmaterialien eingesetzt [45]. Noch hochfestere oder leichtere Materialien würden jedoch die Weiterentwicklung und Optimierung der LH_2 -Technologien ermöglichen und sind deshalb Gegenstand der Forschung.

Aus diesem Grund kommen im Rahmen von AppLHy! Testeinrichtungen zum Einsatz, in denen metallische Probenkörper in Wasserstoffatmosphäre etwa für den Einsatz für Wasserstoff-Pipelines und Komponenten getestet werden können. Solche Testeinrichtungen erfordern jedoch strenge Sicherheitsvorkehrungen durch die nicht unerhebliche Menge an Wasserstoff im Probenraum sowie die Druckbeaufschlagung.

Ein flexible und sicherheitstechnisch einfache Durchführung von Zugmessungen unter variabler Temperatur und variablem Druck kann durch sogenannte Hohlzugproben erreicht werden (Abb. 7) [45]. Hierbei wird axial durch einen rundum Zugprobenkörper (Durchmesser mindestens 6 mm) mittels einer Langlochbohrung ein Kanal (Durchmesser ca. 1 mm) getrieben. Die Probe kann mechanisch in einer Zuganlage mit Kryostat montiert werden und besitzt zusätzlich an den Enden einen Anschluss für eine Druckleitung. So kann in einem Kryostaten die gewünschte Testtemperatur über ein kryogenes Inertgas (z. B. Stickstoff oder Helium) eingestellt werden. Der Kanal innerhalb der Probe wird gleichzeitig über den Druckanschluss mit Wasserstoff mit Drücken bis zu mehreren 100 bar beaufschlagt. So können quasistatische Zugversuche oder Ermüdungsversuche unter Wechsellast an verschiedensten metallischen Proben oder auch Schweißverbindungen schnell und effektiv durchgeführt werden. Für einen systematischen Einsatz wird diese Methode zusammen mit internationalen Partnern bei der DIN/ISO als internationale Norm vorbereitet [46] und ist als ISO 7039:2024-07 erschienen.

Die Herausforderungen erstrecken sich neben den Materialeigenschaften auch auf die verknüpften Verbindungstechniken unter den Umgebungsbedingungen. Aktuelle



Abbildung 7. Materialanalysen bei 20 K in einem Kryostaten zum Versagensverhalten mit gasförmigem oder flüssigem Wasserstoff in einer Hohlzugprobe.

Untersuchungen haben das Ziel, den Designraum benötigter Flüssigwasserstoff-Komponenten zu erweitern.

10 Zusammenfassung

Die nationale Wasserstoffstrategie Deutschlands ist ein wesentlicher Treiber zur Etablierung von Infrastruktur zur Erzeugung, Verteilung und Nutzung verschiedener Wasserstofftechnologien. Flüssigwasserstoff, der im Fokus des TransHyDE-Projektes AppLHy! steht, kann dabei als Beschleunigungstechnologie für den Aufbau der Wasserstoffwirtschaft dienen. Die Technologie hat bereits einen hohen Reifegrad und erlaubt eine zuverlässige Produktion. Weitere Vorteile im Vergleich zu anderen CO_2 -freien Vektoren sind beispielsweise dessen hohe Energiedichte und intrinsische Reinheit sowie die synergetisch nutzbare Kälte der kryogenen Flüssigkeit. Aufgrund dieser Vorzüge findet weltweit ein starker Ausbau der Verflüssiger-Kapazitäten statt. Aktuell befindet sich auch am KIT eine Verflüssigungs-Anlage für Forschungszwecke im Bau. Neu konzipierte Großanlagen sollen künftig die Verflüssigungs-Effizienz weiter steigern.

Bei der Speicherung und dem Transport von LH_2 liegt der Fokus der Forschungsarbeiten auf der Verringerung der Verdampfungsverluste durch die Verbesserung der Tankisolation sowie der Entwicklung effizienter Pumpsysteme

(beispielsweise kryogene Tauchpumpen) und Rückverflüssigungsverfahren. Während der interkontinentale Import von LH₂ vornehmlich per Schiff ablaufen wird, sind für die nationale Distribution zusätzliche Transportoptionen wie Wasserstoff-Pipelines oder LH₂-Trailer im Gespräch bzw. in Betrieb. Herausforderungen bestehen in der Skalierung auf für die weitverbreitete Anwendung relevanter Mengen.

Als CO₂-neutraler Kraftstoff fügt sich Flüssigwasserstoff in eine nachhaltige Energieversorgungsstrategie ein: LH₂ besitzt insbesondere für Fahrzeuge mit mittleren bis großen Tanks wie LKW, Schienenfahrzeuge, Flugzeuge oder Schiffe Vorteile gegenüber anderen Energieträgern ebenso wie in Umgebungen, die ungünstig für den Bau von Pipelines sind. Die Nutzung von LH₂ nicht nur als Treibstoff sondern auch als "Gratis-Kühlung" kann die Effizienz der Energieketten und Fahrzeuge weiter steigern.

Zudem bietet LH₂ ein synergetisches Potenzial für Hochtemperatursupraleiter, die dann durch LH₂ gekühlt werden können und die aufgrund der verlustfreien hohen Stromdichte zu einer weiteren beträchtlichen Effizienz- und kompakten Leistungssteigerung im Antriebsstrang führen.

Insgesamt legt die Arbeit der AppLHy!-Forschenden daher eine Grundlage für den Aufbau einer nachhaltigen und effizienten Flüssig-Wasserstoff-Transport-Logistik in Deutschland.

Eine ausführlichere Darstellung zu Wasserstoff-Verflüssigung, Speicherung, Transport und Anwendung von Flüssig-Wasserstoff findet sich auf der Homepage der Wasserstoff-Leitprojekte [47].

Danksagung

Die AutorInnen danken den Projekt-PartnerInnen des TransHyDE-Projektes AppLHy! für die gute Zusammenarbeit zu Themen rund um Transport und Anwendung von Flüssig-Wasserstoff.

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03HY204A gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den AutorInnen.

Open access Veröffentlichung ermöglicht und organisiert durch Projekt DEAL.

Literatur

- https://www.stiftung-klima.de/app/uploads/2022/03/2022-03-16-Big5-Szenarienvergleich_final.pdf (Aufgerufen am 14.06.2022)
- <https://www.langfristszenarien.de/enertile-explorer-wAssets/docs/LFS3-Langbericht-Energieangebot-final.pdf> (Aufgerufen am 05.09.2022)
- https://juser.fz-juelich.de/record/877960/files/Energie_Umwelt_499.pdf (Aufgerufen am 05.09.2022)
- IEA, *Global Hydrogen Review 2021*, International Energy Agency, Paris 2021, 68.
- A. T. Wijayanta et al., *Int. J. Hydrogen Energy* 2019, 44 (29), 15026–15044. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.04.112>
- T. M. Flynn, *Cryogenic Engineering*, 2nd ed., Dekker, New York 2005.
- E. W. Lemmon, *NIST Standard Reference Database 23* 2018, in: *Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties-REFPROP, Version 10.0*, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg. DOI: <https://doi.org/10.18434/T4/1502528>
- <https://h2tools.org/hyarc/calculator-tools/lower-and-higher-heating-values-fuels> (Aufgerufen am 31.08.2023)
- <https://www.nasa.gov/feature/kennedy-plays-critical-role-in-large-scale-liquid-hydrogen-tank-development> (Aufgerufen am 28.07.2023)
- <https://www.airbus.com/de/who-we-are/our-worldwide-presence/germany/willkommen-im-airbus-hubberlin/zukunft-des-fliegens> (Aufgerufen am 07.08.2023)
- J. Cigal, in *Specialty Gas Report* 2016, 4, 26.
- H. Häring, *Industrial Gases Processing*, Wiley-VCH, Weinheim 2007.
- H. Quack, *Das Grassmann-Diagramm und die ortho-para-Umwandlung*, DKV-Tagung 2022, Magdeburg, November 2022.
- L. Decker, *Advances in Lindes Hydrogen Liquefaction*, European Cryogenics Days 2021, online, November 2021.
- Air Liquide, *Hydrogen liquefaction – Liquid hydrogen; North Las Vegas plant – Hydrogen as a vector of energy*, European Cryogenics Days, März 2023.
- https://www.airliquide.com/sites/airliquide.com/files/2021-07/air-liquide-hydrogen-activities-are-accelerating-south-korea-demand-growing-fast_61f06a46e874.pdf (Aufgerufen am 31.08.2023)
- C. Haberstroh, *Kryogene Wasserstoff-Technologie*, VDI-Seminar Kryotechnik, 2022.
- M. Bracha, in *DKV-Tagungsbericht 2008*, Ulm 2008, 455–460.
- <https://www.idealhy.eu> (Aufgerufen am 28.07.2023)
- S. Kamiya, *Phys. Procedia* 2015, 67, 11–19. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2015.06.004>
- J. E. Fesmire, *Overview of the New LH₂ Sphere at NASA Kennedy Space Center*, DOE/NASA Advances in Liquid Hydrogen Storage Workshop, online, August 2021.
- M. Bracha, *Int. J. Hydrogen Energy* 1994, 19 (1), 53–59. DOI: [https://doi.org/10.1016/0360-3199\(94\)90177-5](https://doi.org/10.1016/0360-3199(94)90177-5)
- <https://www.energy.gov/eere/vehicles/articles/us-drive-hydrogen-delivery-technical-team-roadmap> (Aufgerufen am 31.08.2023)
- <https://www.mcdermott.com/getmedia/36e829cb-9f07-4670-9ce5-90632a2f2cd8/cbi-liquid-hydrogen-brochure-2022-digital.pdf.aspx> (Aufgerufen am 16.09.2023)
- A. Jacobsen et al., *Liquid Hydrogen Storage Technologies*, Liquid Hydrogen Technologies Workshop des DOE, online, Februar 2022.
- J. K. Partridge, in *AIP Conference Proceedings 1434*, AIP Publishing, Spokane, USA 2012, 1765–1770.
- J. E. Fesmire, T. M. Tomsik et al., in *AIP Conference Proceedings 1573*, AIP Publishing, Spokane, USA 2014, 1365–1372.
- <https://www.nasa.gov/feature/ultra-cold-storage-liquid-hydrogen-may-be-fuel-of-the-future> (Aufgerufen am 15.12.2022)
- Kawasaki Heavy Industries Ltd, *Kawasaki Technical Review – Special Issue on Hydrogen Energy Supply Chain*, No. 182, Kawasaki Heavy Industries Ltd 2021.

- [30] https://global.kawasaki.com/en/corp/newsroom/news/detail/?f=20210506_9983 (Aufgerufen am 31.08.2023)
- [31] FNB Gas, *Planungsstand Wasserstoff-Kernnetz*, Fernleitungsnetzbetreiber, Berlin **2023**.
- [32] J. Hoelzen et al., *Energy Convers. Manage.: X* **2022**, 14, 100206. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2022.100206>
- [33] S. Yamada et al., *J. Phys.: Conf. Ser.* **234** **2010**, 3, 32064. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/234/3/032064>
- [34] <https://www.nasa.gov/feature/innovative-liquid-hydrogen-storage-to-support-space-launch-system> (Aufgerufen am 10.05.2022)
- [35] F. Sensfuß et al., *Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland 3*, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), Karlsruhe **2021**, 33–36.
- [36] T. Busch et al., *Analyse von Transport-Optionen für flüssigen Wasserstoff in Deutschland*, IEWT 2021, 12, Internationale Energiewirtschaftstagung der TU Wien, September **2021**.
- [37] M. Reuß et al., *Energies* **2021**, 14 (11), 3166. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14113166>
- [38] A. Joerg, *Shell Wasserstoff-Studie: Energie der Zukunft? : Nachhaltige Mobilität durch Brennstoffzelle und H₂*, Wuppertal Institute for Climate, Environment and Energy, **2017**.
- [39] S. Tamhankar, in *DOE Hydrogen Transmission and Distribution Workshop*, US Department of Energy, Golden, USA **2014**.
- [40] T. Arndt, in *Jahrestagung des Forschungsverbunds Erneuerbare Energien: Mit Wasserstoff zur Klimaneutralität – von der Forschung in die Anwendung*, Berlin **2021**, 97–99.
- [41] H. Thomas et al., *Renewable Sustainable Energy Rev.* **2016**, 55, 59–72. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.041>
- [42] V. S. Vysotsky et al. *Phys. Procedia* **2015**, 67, 189–194. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2015.06.033>
- [43] T. Arndt, M. Noe, *Superconductivity for Green Energy*, EUCAS 2021, Moskau, September **2021**.
- [44] M. Noe, M. Bauer, *Phys. Unserer Zeit* **2021**, 52 (6), 290–297. DOI: <https://doi.org/10.1002/piuz.202101615>
- [45] A. M. Kreiser, *Analyse von Störfällen mit Wasserstoff in bisherigen Anwendungsbereichen mit besonderer Berücksichtigung von LH₂*, IKE (Bericht), Stuttgart **1994**.
- [46] T. Ogata et al., *J. Jpn. Inst. Metals* **2008**, 72 (2), 125–131.
- [47] ISO/TC 164/SC 1/WG 9, *Tensile testing, method in high-pressure hydrogen environment*, AFNOR, **1981**.
- [48] A. Alekseev et al., *Wasserstoff-Verflüssigung, Speicherung, Transport und Anwendung von flüssigem Wasserstoff*, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe **2023**. DOI: <https://doi.org/10.5445/IR/1000155199>
- [49] M. Wolf, „AppLHy! – Transport and Application of Liquid Hydrogen“, European Cryogenics Days, 28.03.2023, Darmstadt, Germany, online: https://indico.gsi.de/event/15856/contributions/69744/attachments/43302/60747/20230327-1700-mjw-PR%C3%84S_ECD-Hydrogen-AppLHy-Wolf.pdf (Letzter Zugriff am 6.12.2024)
- [50] T. Jordan et al., Stand der Kenntnisse und Technik bezüglich Wasserstoffsicherheit, *Chem. Ing. Tech.* **2024**, 96 (1–2), 192–210. DOI: <https://doi.org/10.1002/cite.202300141>
- [51] M. Bäuerle et al., H₂-Transport- und Speicheroptionen: Normen und technische Regeln. Das Projekt TransHyDE-Norm – Normen für den Transport von Wasserstoff nach und in Deutschland, *Chem. Ing. Tech.* **2024**, 96 (1–2), 211–219. DOI: <https://doi.org/10.1002/cite.202300145>
- [52] C. Haberstroh, Wasserstoff: Ortho/Para-Umwandlung und Verflüssigung, *Chem. Ing. Tech.* **2024**, 96 (1–2), 43–54. DOI: <https://doi.org/10.1002/cite.202300128>