

TECHNISCHE UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG
INSTITUT FÜR THERMODYNAMIK

**Erforschung und Entwicklung eines
neuartigen, anwendungsspezifischen und
betriebssicheren Konzepts für eine
skalierbare, dezentrale
Wasserstoffverflüssigungsanlage (DEWAS)**

Abschlussbericht zum Förderprojekt Az: 38124/01

Verfasser:
Aike Tappe
Jaron Buhlmann

17. November 2025

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	2
Tabellenverzeichnis	3
Abkürzungsverzeichnis	4
1 Zusammenfassung	5
2 Einleitung	6
3 Der Linde-Hampson-Verflüssiger	10
3.1 Prozesskonzept und Betriebsparameter des dezentralen Wasserstoffverflüssigers	10
3.1.1 Speicherkapazität und Verflüssigungsrate	12
3.1.2 Festlegung von Niederdruck- und Hochdruckniveau	12
3.1.3 Simulationsbasierte Untersuchung des Prozesskonzepts	16
3.2 Wärmeübertrager	16
3.3 Speicherung des LH2	19
3.4 Thermische Isolierung	20
3.4.1 Vakuumisolierung	21
3.4.2 Multilayer Insulation (MLI)	23
3.5 Ortho-Para-Katalyse	27
3.6 Sicherheitskonzept	29
3.7 Diskussion und Bewertung der Ergebnisse	31
4 Fazit	37
Literaturverzeichnis	38
A Anhang	42
A.1 Technische Zeichnungen der Vakuumkammer	42
A.2 Technische Zeichnung des LH2-Speichers	46

Abbildungsverzeichnis

1	Inversionskurve des Wasserstoffs	10
2	Schematischer Aufbau der dezentralen Anlage zur Wasserstoffverflüssigung und T,h-Diagramm des Prozesses	11
3	Bilanzraum für die Auslegung des Hochdrucks und Flüssigphasenanteil im T,h-Diagramm	13
4	Flüssigphasenanteile z für Niederdruckniveaus von 1-5 bar.	15
5	Grafische Darstellung des Prozessmodells auf der Benutzeroberfläche Dymola.	16
6	Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der Temperatur für Kupfer und Edelstahl	17
7	Wärmeübertrager aus Kupferrohr	18
8	Lötverbindungen zwischen dem Kupferrohr des Gegenstromwärmeübertragers und Edelstahlrohren.	19
9	Wärmeeinträge in den kryogenen Prozessabschnitt	20
10	Vakuumkammer	21
11	Effektive Wärmeleitfähigkeit einer MLI-Probe in Abhängigkeit vom Druck innerhalb einer Vakuumisolierung	22
12	Techniken der MLI-Anbringung	24
13	MLI-Anbringung mit der Methode der Lagenüberlappung	25
14	Verschließen des MLI-Überstands	26
15	Temperaturabhängige Ortho-Para-Zusammensetzung des Wasserstoffs	27
16	Temperaturabhängige Umwandlungsenthalpie von Normal- zu Gleichgewichtswasserstoff	28
17	Eisen(III)-oxid als Katalysator der Ortho-Para-Umwandlung	29

Tabellenverzeichnis

1	Flüssigphasenanteile für verschiedene Niederdruckniveaus	15
2	Projektfinanzierung	31
3	Gegenüberstellung der geplanten und realen Sachkosten.	32

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

Abkürzungen

CF-HX	Counter Flow Heat Exchanger (Gegenstromwärmeübertrager)
CcH2	kryokomprimierter Wasserstoff
CO2	Kohlenstoffdioxid
Cu-DHP	Kupfer, desoxidiert
H2	Wasserstoff
LH2	Flüssigwasserstoff
LOHC	Liquid Organic Hydrogen Carrier (flüssige org. Wasserstoffträger)
MLI	Multi Layer Insulation
tpd	Tonnen pro Tag

Symbole

h	spezifische Enthalpie, kJ kg^{-1}
\dot{m}	Massenstrom, kg s^{-1}
μ_{JT}	Joule-Thompson-Koeffizient, K Pa^{-1}
p	Druck, bar oder Pa
\dot{Q}	Wärmestrom, W
T	Temperatur, K
\dot{W}	Leistung, W
z	Flüssigphasenanteil, einheitslos

1 Zusammenfassung

Im Projekt DEWAS wurde eine dezentrale Anlage zur Verflüssigung von Wasserstoff nach dem Linde-Hampson-Prinzip entwickelt. Deutschlandweit existieren nur wenige Anlagen zur Verflüssigung geringer Mengen Wasserstoff, und eine Versorgung mit LH2 ist für Unternehmen und Forschungseinrichtungen mit hohen Kosten verbunden, da zentral verflüssigter Wasserstoff in hohen Abnahmemengen geliefert wird und die Kunden eigene stationäre Speichersysteme installieren müssen. Für kleine mittelständische Unternehmen und Forschungseinrichtungen, die keinen Zugang zu großen LH2-Speichern haben, kann eine dezentrale, bedarfsgerechte Versorgung mit LH2 das Feld für Forschung und Entwicklung im Zusammenhang mit dieser Speicherform des Wasserstoffs öffnen und einen wichtigen Beitrag zur Etablierung von Wasserstoff als Energieträger leisten.

Wichtige Ziele auf dem Weg zu einer dezentralen Versorgung mit LH2 im Raum Braunschweig konnten erreicht werden. Das Prozesskonzept wurde ausgearbeitet und simulationsbasiert validiert. Der Prototyp wurde daraufhin zu einem Großteil aufgebaut. Zum Projektende ist jedoch noch keine Inbetriebnahme erfolgt. Hauptursachen für die Verzögerung waren Schwierigkeiten bei der Finanzierung, da die realen Kosten deutlich über der ursprünglichen Schätzung lagen, sowie Herausforderungen bei der Erstellung eines Sicherheitskonzepts und der damit verbundenen Beschaffung sicherheitskritischer Bauteile, die für die Spezifikationen der Anlage am Markt teilweise nicht verfügbar waren.

Nach Projektende wird die Anlage aus eigenen Mitteln fertiggestellt. Eine Inbetriebnahme auf dem Außengelände des Wasserstoff Campus Salzgitter ist bis Mitte 2026 geplant. Das Prozesskonzept wird nach der Inbetriebnahme hinsichtlich des Wirkungsgrades und der Wirtschaftlichkeit abschließend evaluiert. Erkenntnisse aus dem Projekt werden in weitere Projektaktivitäten im Zusammenhang mit der dezentralen LH2-Versorgung einfließen. Im EU-geförderten Projekt „H2-Infrastruktur am NFF - H2-iNFFra“ werden beispielsweise am sogenannten H2-Terminal in der Nähe des Braunschweiger Forschungsflughafens innovative Infrastrukturen für Wasserstoff- und Brennstoffzellensysteme eingerichtet. Das Institut für Thermodynamik der TU Braunschweig ist hier mit der Errichtung von Infrastruktur zur dezentralen Verflüssigung von Wasserstoff beteiligt.

Das Projekt wurde von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt gefördert (Az: 38124/01). Die Unternehmen TLK Thermo GmbH und WS Wärmeprozessstechnik GmbH haben das Projekt mit jeweils 15.000 € unterstützt.

2 Einleitung

Angesichts des anthropogenen Klimawandels ist es dringend erforderlich, fossile Energieträger durch erneuerbare Energiequellen zu ersetzen. Der fluktuierenden Einspeisung von z.B. Solar- und Windenergie muss dabei mit geeigneten Lösungen zur Zwischenspeicherung begegnet werden. Grüner Wasserstoff ermöglicht eine flexible und bedarfsgerechte Nutzung erneuerbarer Energien. Die Farbgebung bezieht sich hierbei auf die Art der Erzeugung des Wasserstoffs (H₂) - im Falle des grünen H₂ wird Strom aus erneuerbaren Energien in Elektrolyseuren für die Aufspaltung von Wasser genutzt [Inc+23]. Die Abkehr von fossilen Energieträgern in verschiedenen Sektoren kann durch grünen H₂ unterstützt werden. Beispiele sind die chemische Industrie, wo grüner H₂ den durch Dampfreformierung aus Erdgas gewonnenen grauen H₂ als Grundstoff für verschiedene chemische Syntheseprozesse ersetzen kann [Gua+23], oder die Stahlindustrie, in der grüner H₂, eingesetzt als Reduktionsmittel anstelle von Koks, eine Stahlproduktion ohne CO₂-Emissionen ermöglicht [VÅN18]. Im Verkehrssektor bietet grüner H₂ großes Potenzial als nachhaltiger Kraftstoff, z.B. in der Luftfahrt, der Binnenschifffahrt oder in Nutzfahrzeugen [Höl24; dJT22; Pom+24]. Batterieelektrische Antriebe sind für diese Verkehrsmittel aufgrund ihres hohen Gewichts und der begrenzten Reichweite oft ungeeignet. Darüber hinaus können flexibel zuschaltbare Gaskraftwerke, in denen H₂ verbrannt wird, zukünftig zur Stabilität des Stromnetzes beitragen [Bun24b].

Zwar besitzt H₂ mit 33,3 kWh/kg die höchste gravimetrische Energiedichte aller Brennstoffe [Hub+18], übertrifft also auch fossile Energieträger wie Diesel, Benzin, Kerosin, Heizöl oder Erdgas, die Dichte von H₂ ist jedoch sehr gering. Daher müssen Speicherformen für H₂ eine möglichst hohe volumetrische Energiedichte für Speicherung und Transport gewährleisten. Hierbei kann zwischen der Speicherung in Trägermolekülen, wie z.B. Ammoniak, Methanol, LOHC (engl. Liquid Organic Hydrogen Carrier) oder Dimethylether und der Speicherung in reiner Form unterschieden werden [Ago23; Sch+23]. Um eine hinreichende volumetrische Energiedichte für reinen H₂ zu erreichen, muss dieser entweder unter hohem Druck (üblicherweise 350-700 bar) und/oder in tiefkaltem (kryogenem) Zustand gespeichert werden. Unter den Speicherformen für reinen H₂ besitzt kryogener Flüssigwasserstoff (LH₂) mit 8,640 kJ m⁻³ eine höhere volumetrische Energiedichte als gasförmiger H₂ in Drucktanks (2,880 kJ m⁻³ für 350 bar und 4,680 kJ m⁻³ für 700 bar). Dieser Wert wird vom sogenannten kryokomprimierten H₂ (engl. cryo-compressed H₂, CcH₂) mit 10,080 kJ m⁻³ zwar übertroffen, jedoch lässt sich LH₂ im Gegensatz zu CcH₂ bei moderaten Drücken speichern. Seine relativ hohe volumetrische Speicherdichte bei gleichzeitig moderatem Speicherdruck macht LH₂ für verschiedene Anwendungen interessant:

- **LH₂ als Speicherform für den maritimen Transport:** Deutschland wird seinen prognostizierten H₂-Bedarf nicht durch eigene Produktion decken können, der

Energiebedarf der Industrienation ist zu hoch im Verhältnis zu den Kapazitäten an erneuerbaren Energien [Bun24a; IRE22; Shi+23]. Ein Teil des Wasserstoffs wird daher importiert werden müssen. Ab einer Distanz von ca. 4000 km eignet sich hierfür am besten der Import per Schiff [Sta+22]. Neben H₂-Derivaten wie Ammoniak, LOHC, Methanol und Dimethylether ist in diesem Zusammenhang auch LH₂ als Speicherform im Fokus [Sta+22; Ago23; PvG; Sch+23].

- **LH₂ in mobilen Anwendungen:** H₂ wird als Treibstoff für den Luftverkehr, den Nutz- und Schwerlastverkehr sowie der Binnenschifffahrt erforscht. In der Luftfahrt ist die Speicherung in kryogener Form (LH₂ oder CcH₂) an Bord der Flugzeuge aufgrund der hohen volumetrischen Energiedichte dabei unabdingbar [Hoe+22]. LH₂-Speichersysteme sind zudem wesentlich leichter als solche, in denen Wasserstoff unter hohem Druck gespeichert wird. Daher werden LH₂-betankte Flugzeuge bereits von mehreren namhaften Akteuren in der Luftfahrt erforscht [Cle24; Zer24; H2F23; HyN23]. Auch für den Schwerlastverkehr werden, neben den üblicheren Druckgasspeichern, LH₂-Tanksysteme entwickelt, insbesondere für Fahrzeuge, die im Langstreckentransport hohe Reichweiten erzielen müssen. Aktuelles Beispiel ist der GenH₂-BZ-LKW der Daimler Truck AG, dessen Serienreife für 2027 geplant ist [Dai23]. Dass Nutzfahrzeuge mit über 500 kg Wasserstoff on-board bevorzugt mit LH₂ anstelle von Druckgas betankt werden sollten, gilt inzwischen als gesichert [Ale+23]. Dies betrifft auch Bergbau- und Baufahrzeuge, Lokomotiven für den Gütertransport sowie Schiffe.
- **LH₂ als Speicherform für stationäre Zwischenspeicher:** Um zukünftige Abnehmer von H₂ zuverlässig zu versorgen, ist ein Ausbau eines H₂-Pipelinetzes in Deutschland und Europa geplant. Als Übergangslösung oder für Abnehmer, die nicht an dieses Netz angebunden werden, stellen stationäre LH₂-Speicher eine Möglichkeit für die H₂-Versorgung dar. So können industrielle Prozesse kurzfristig hin zur Nutzung von H₂ umgestellt werden, eine Versorgung erfolgt dann aus stationären Speichertanks, die mit LH₂ befüllt werden [Ale+23]. Auch die H₂-Versorgung an Tankstellen ohne Anbindung an ein Pipelinetz ist so möglich.

Selbstverständlich geht mit den o.g. potenziellen Einsatzbereichen für LH₂ innerhalb der zukünftigen Energiewirtschaft ein wachsender Bedarf an Forschung und Entwicklung einher. Die geringe Dichte von H₂, seine korrosiven Eigenschaften und, darüber hinaus, die kryogenen Temperaturen von LH₂ stellen besondere Anforderungen an Komponenten von LH₂-Speichersystemen, wie kryogene Pumpen, Ventile und Wärmeübertrager, Rohrsysteme und Speichertanks. Aus diesen Speichersystemen muss H₂ zudem dynamisch und effizient für den sich anschließenden Gebrauch, z.B. in Brennstoffzellen oder Turbinen, bereitgestellt werden. Experimentelle Untersuchungen mit LH₂ sind in diesem Zusammenhang unerlässlich.

In Europa kann LH₂ von den führenden Gasversorgern Air Products, Linde und Air Liquide bezogen werden, die H₂ *zentral* verflüssigen. Im Folgenden werden solche Anlagen als zentral bezeichnet, die sich im dauerhaften stationären Betrieb befinden und Verflüssigungsraten von 0,3–34 Tonnen pro Tag (tpd) erzielen [KSN10]. Linde betreibt in Deutschland die Standorte Leuna (zwei Anlagen mit jeweils 5 tpd) und Ingolstadt (4,4 tpd), Air Products ist in Rozenburg/Niederlande (5 tpd) aktiv und Air Liquide in Lille/Frankreich (10,5 tpd) [KSN10; Ale+23]. Die Auswahl der technischen Komponenten und Verfahrensparameter richtet sich in den eben genannten Anlagen vor allem nach Investitions- und Betriebskosten und ist Gegenstand laufender Forschung, da sie stark von der Anlagengröße abhängt. Zentrale Anlagen erzielen durch die hohen Produktionsmengen niedrige Kilopreise, während bei kleinen Abnahmemengen die Preise drastisch steigen. Kunden müssen eigene, stationäre Speichertanks installieren, verbunden mit hohen Investitions- und Mietkosten, Baugenehmigungen und Erdbauarbeiten. Diese Art der LH₂-Versorgung ist für viele Forschungseinrichtungen und Unternehmen, insbesondere bei unregelmäßigem oder geringem Bedarf, unwirtschaftlich oder gar nicht praktikabel.

Aus dieser Versorgungslage heraus ergab sich die Zielsetzung des hier beschriebenen Projekts: der Aufbau einer flexiblen, dezentralen Versorgung mit kleinen Mengen LH₂ für Forschung und Entwicklung. Für eine solche Versorgung mit geringen Mengen LH₂ existierten zu Projektbeginn nur vereinzelt Nischenlösungen. An der TU Dresden wird beispielsweise eine Helium-Rückgewinnungsanlage genutzt, um mit dem kryogenen Helium H₂ zu verflüssigen [HK07]. Im Rahmen eines koreanisch-amerikanischen Projekts wurde zudem ein handelsüblicher Gifford-McMahon-Kühler, der üblicherweise zur Heliumrückgewinnung dient, für die dezentrale Wasserstoffverflüssigung eingesetzt [Gar+15]. Dieses Konzept wurde ebenfalls von einer japanischen Forschergruppe angewendet [Nak+10]. Vor Projektbeginn wurden diese und weitere technische Lösungen für eine dezentrale LH₂-Versorgung gegenübergestellt und hinsichtlich ihrer Vor- und Nachteile bewertet. Ein Prozesskonzept wie an der TU Dresden war nicht denkbar, da es von der infrastrukturellen Besonderheit der dort vorhandenen Helium-Rückgewinnungsanlage abhängig ist. Als Nachteile der sogenannten Kryokühler, wie beispielsweise dem in [Gar+15] und [Nak+10] genutzten Gifford-McMahon-Kühler, wurden zudem die begrenzte Leistung der Kühler und die erwarteten hohen Anschaffungskosten identifiziert. Eine Skalierung der Verflüssigungsraten wäre nur durch Zusammenschaltung mehrerer Kühler möglich. Für das geplante Projekt wurde das Linde-Hampson-Verfahren als bevorzugte Lösung identifiziert. In diesem Prozess wird gasförmiger Wasserstoff, z.B. aus Druckgasflaschen, in einer mehrstufigen Vorkühlung auf ca. 42 K gebracht, bevor das Gas durch ein Expansionsventil isenthalp gedrosselt und damit in das Zweiphasengebiet expandiert wird. Für das Linde-Hampson-Verfahren werden bei einer offenen Prozessführung weder Verdichter noch Expansionsmaschinen benötigt, was die Anschaffungskosten senkt.

Selbst bei einer geschlossenen Prozessführung wird ein Verdichter auf dem Umgebungstemperaturniveau eingesetzt - neben dem Expansionsventil werden also keine weiteren beweglichen Bauteile benötigt, die im kryogenen Temperaturbereich arbeiten und in der Anschaffung relativ teuer sind. Eine Hochskalierung der Verflüssigungsmengen wäre in diesem Prozess durch nachträgliche Anpassungen von Wärmeübertragern und Rohrleitungen ohne größere konstruktive Änderungen möglich. Perspektivisch sollte ein Transport der Anlage direkt zum Verbraucher des LH2 möglich sein, sodass vor Ort die benötigten Mengen verflüssigt werden könnten.

Erster Punkt der Aufgabenstellung des Projekts war die Erstellung eines Anforderungskatalogs für eine dezentrale Wasserstoffverflüssigungsanlage nach dem Linde-Hampson-Prinzip. Die identifizierten Anforderungen sollten dann in ein konkretes Anlagenkonzept einfließen, alternative Anlagenkonzepte sollten parallel dazu identifiziert und hinsichtlich ihrer Vor- und Nachteile eingeordnet werden. Auf die Konzeptionierung sollte zunächst die simulationsbasierte Bewertung der Umsetzbarkeit mit Modelica erfolgen. Im Projekt war zudem die Ausarbeitung eines Sicherheitskonzeptes für die geplante Anlage Teil der Aufgabenstellung. Schließlich sollte ein Prototyp entworfen und praktisch umgesetzt werden. Nach Aufbau und Machbarkeitsdemonstration waren weitere Untersuchungen mit dem Prototypen geplant, um u.a. die maximal mögliche Verflüssigungsmenge sowie die physikalische und ökonomische Effizienz zu ermitteln. Zustandsmessungen entlang des Wasserstoffpfads zur Validierung des Simulationsmodells stellten den abschließenden Teil der Aufgabenstellung im Projekt dar.

3 Der Linde-Hampson-Verflüssiger

Für das hier vorgestellte Projekt wurde das Akronym DEWAS gewählt, das auch in der hier folgenden Durchführungsbeschreibung verwendet wird. Abschnitt 3.1 beschreibt die Auslegung des Linde-Hampson-Verflüssigers inklusive der Festlegung wichtiger Betriebsparameter und der simulationsbasierten Untersuchung des Prozesskonzepts. Die Abschnitte 3.2 bis 3.5 behandeln im Detail einzelne technische Aspekte des Anlagenkonzepts und dessen praktischer Umsetzung: den Bau der Wärmeübertrager, die Speicherung und Entnahme des LH2, die thermische Isolierung sowie die Ortho-Para-Katalyse. Anschließend befasst sich Abschnitt 3.6 mit dem Sicherheitskonzept der Anlage, bevor in Abschnitt 3.7 eine Diskussion und Bewertung der Ergebnisse sowie die Darstellung von Maßnahmen zur Verbreitung der Projektergebnisse erfolgt.

3.1 Prozesskonzept und Betriebsparameter des dezentralen Wasserstoffverflüssigers

Wie bereits im vorherigen Kapitel dargestellt, wurde in DEWAS das Linde-Hampson-Verfahren zur dezentralen Verflüssigung von Wasserstoff ausgewählt. Dieses Verfahren war eines der ersten, die Ende des 19. Jahrhunderts zur Verflüssigung von Wasserstoff eingesetzt wurden [KSN10]. Es beruht auf dem Joule-Thompson-Effekt, also der Temperaturänderung eines realen Gases bei einer isenthalpen Drosselung.

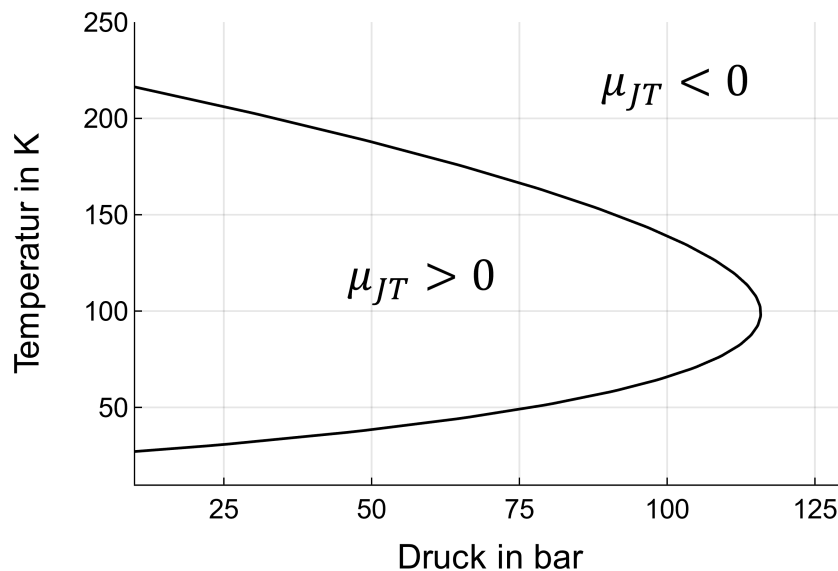


Abbildung 1: Inversionskurve des Wasserstoffs. μ_{JT} entspricht der Ableitung der Temperatur nach dem Druck bei konstanter Enthalpie. Für alle Druck-Temperatur-Paare innerhalb der Kurve gilt $\mu_{JT} > 0$ und eine isenthalpe Drosselung führt zur Abkühlung des Wasserstoffs.

Hierbei beschreibt der Joule-Thompson-Koeffizient, μ_{JT} , die Ableitung der Temperatur nach dem Druck bei konstanter Enthalpie. Damit eine Abkühlung des Gases erfolgt, muss es unterhalb seiner druckabhängigen Inversionstemperatur liegen [Bej16]. Abb. 1 zeigt die Inversionskurve des Wasserstoffs. Für alle Druck-Temperatur-Paare innerhalb der Kurve, dort wo gilt $\mu_{JT} > 0$, führt eine isenthalpe Druckminderung zu einer Abkühlung des Gases. Außerhalb dieser Kurve gilt $\mu_{JT} < 0$, auf eine isenthalpe Druckminderung folgt hier also eine Erwärmung des Gases. Wie in Abb. 1 zu sehen, besitzt Wasserstoff bei Umgebungstemperatur für alle Drücke einen negativen Joule-Thompson-Koeffizienten und muss daher für die Verflüssigung durch das Linde-Hampson-Verfahren vorgekühlt werden. In der Literatur wird bezogen auf die Wasserstoffverflüssigung daher auch vom *pre-cooled* Linde-Hampson-Verfahren gesprochen [KSN10].

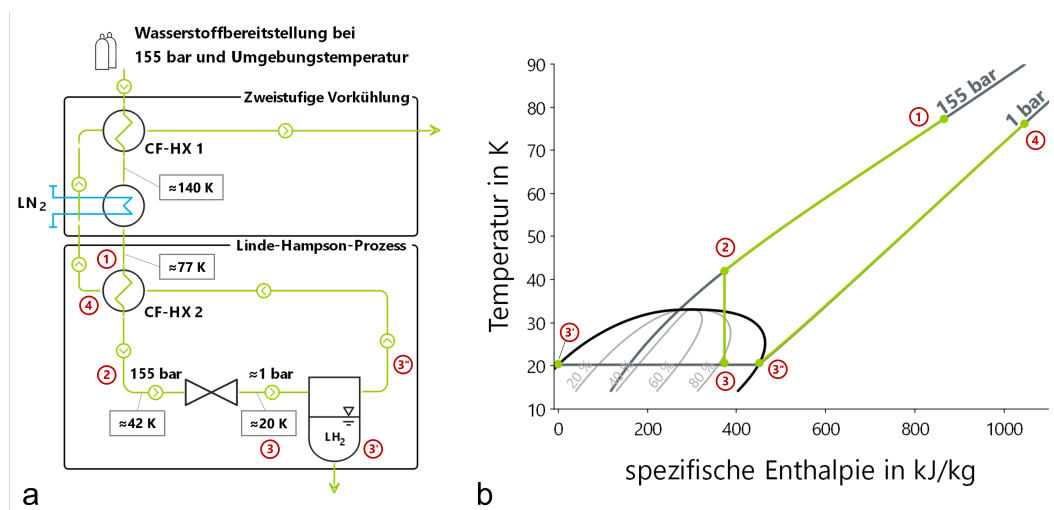


Abbildung 2: Schematischer Aufbau der dezentralen Anlage zur Wasserstoffverflüssigung

(a). Der vorgekühlte, gasförmige Wasserstoff wird durch eine isenthalpe Drosselung in sein Zweiphasengebiet expandiert. Der Flüssiganteil wird in einem Schwereabscheider gesammelt, während das zurückströmende Gas zur Vorkühlung in den Gegenstromwärmeübertragern CF-HX 1 und CF-H 2 verwendet wird.

(b) T,h-Diagramm des Prozesses, beginnend nach der Vorkühlung mit Flüssigstickstoff.

Die markierten Zustandspunkte beziehen sich auf die Nummerierung in (a).

Abb. 2 a zeigt den schematischen Prozess des dezentralen Verflüssigers entsprechend der letztendlichen Auslegung, Abb. 2 b das zugehörige T,h-Diagramm. Für den ersten Prototyp wird Wasserstoff aus Druckgasflaschen bereitgestellt. Nach Entnahme aus dem Flaschenbündel durchläuft das komprimierte Gas eine zweistufige Vorkühlung. Im Gegenstromwärmeübertrager CF-HX 1 (siehe Abb. 2a) dient gasförmiger Wasserstoff, der bereits den Linde-Hampson-Prozess durchlaufen hat, als Wärmesenke. Die zweite Stufe der Vorkühlung besteht aus einem einfachen Rohrwärmeübertrager, der in ein

Flüssigstickstoffbad getaucht ist. Nachdem der Wasserstoff dort ungefähr auf die Siedetemperatur des Stickstoffs bei Umgebungsdruck (77 K) abgekühlt wurde, beginnt der eigentliche Linde-Hampson-Prozess: Das Gas strömt durch den zweiten Gegenstromwärmeübertrager CF-HX 2 (2) und durchläuft dann eine isenthalpische Drosselung (2 → 3), durch die der Wasserstoff in sein Zweiphasengebiet expandiert wird. Die flüssige Phase wird abgetrennt (3') und der zurückströmende Dampf (3'') wird zur Kühlung des einströmenden Gases (1) im Gegenstromwärmeübertrager CF-HX 2 (3'' → 4) verwendet.

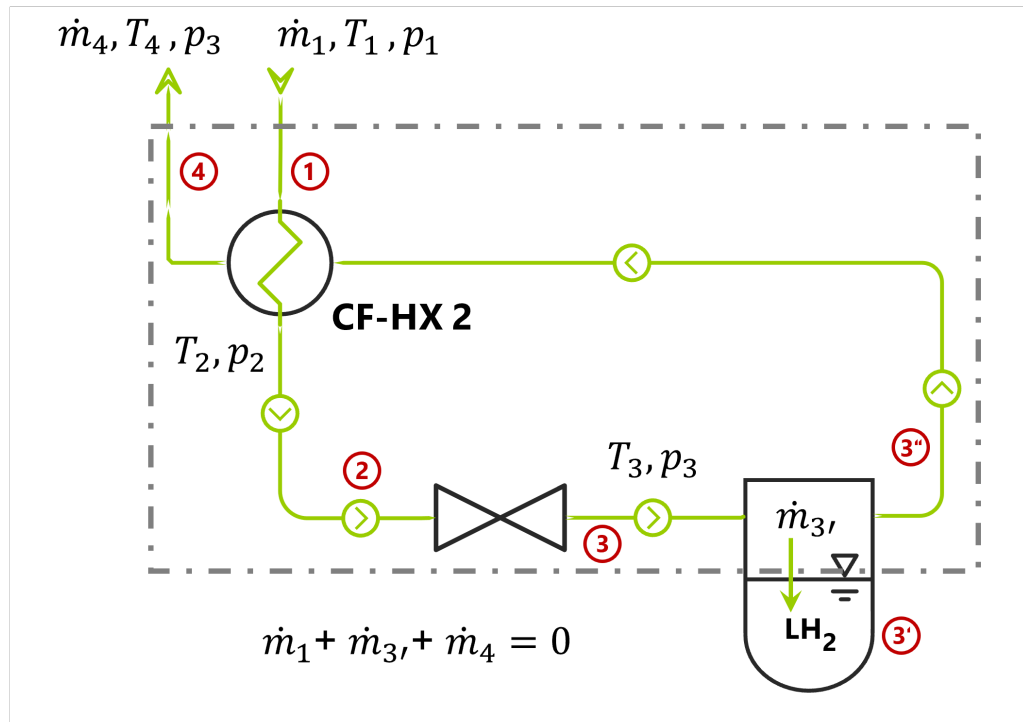
3.1.1 Speicherkapazität und Verflüssigungsrate

In Kapitel 2 wird die Motivation für eine dezentrale, flexible Versorgung mit Flüssigwasserstoff (LH₂) bereits erläutert. Demnach soll verschiedenen Akteuren in Forschung und Entwicklung ein niederschwelliger Zugang zu LH₂ ermöglicht werden. Für diesen Zweck wurde ein maximales Speichervolumen des Verflüssigers von 20 l als ausreichend erachtet. Anhand dieser Überlegung wurde der Massenstrom des Wasserstoffs in der Anlage ausgelegt: Bei 1 bar entsprechen 20 l LH₂ (20 K) einer Masse von 1,43 kg. Der Speicher sollte innerhalb eines Arbeitstags durch die Verflüssigung befüllbar sein. Die Anlage müsste vor- und nachbereitet werden; für diese Prozessschritte wurde etwa die Hälfte der Betriebszeit abgeschätzt. Bei einer Verflüssigungsrate von 18 % (siehe Abschnitt 3.1.2) würde ein Feedmassenstrom aus den Druckgasflaschen von 2 kg h⁻¹ ausreichen, um den Speicher innerhalb von etwa vier Stunden zu füllen. Dieser Massenstrom wurde daher für die weitere Prozessplanung angesetzt.

3.1.2 Festlegung von Niederdruck- und Hochdruckniveau

Für die Speicherung des LH₂ ist in der hier vorgestellten Anlage ein Druckbehälter mit einem Volumen von 20 l und einem maximalen Betriebsdruck von 10 bar vorgesehen (siehe 3.3). Durch diesen maximalen Betriebsdruck ist das Druckniveau hinter dem Drosselventil beschränkt. Als obere Grenze für den Druck hinter der Drossel wurden 5 bar gesetzt, damit Druckerhöhungen durch Temperaturschwankungen während des Prozesses nicht unmittelbar zur Öffnung der vorgesehenen Sicherheitsventile führen (Abb. 2 zeigt den Prozess beispielhaft mit einem Niederdruckniveau von 1 bar). Der Hochdruck vor dem Drosselventil wurde dann mit dem Ziel ausgelegt, nach der Druckminderung den theoretisch maximalen Flüssigphasenanteil zu erhalten, gemessen in Kilogramm LH₂ pro Kilogramm investiertem gasförmigem Wasserstoff. Im Folgenden wird dieser Flüssigphasenanteil als z bezeichnet. Er entspricht der in Abb. 3 b markierten Strecke im T,h-Diagramm.

a



b

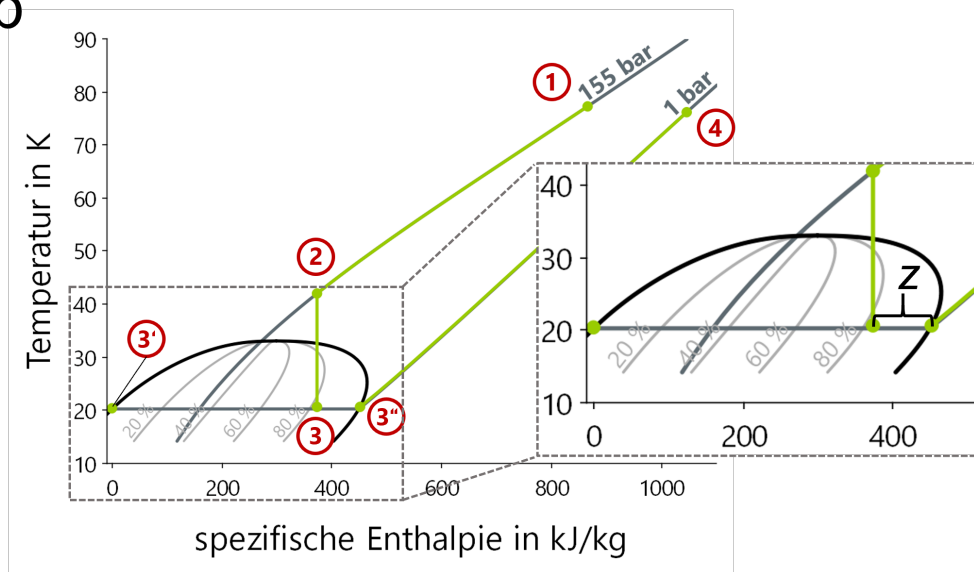


Abbildung 3: Bilanzraum für die Auslegung des Hochdrucks (a). Der Hochdruck vor der Drossel, p_1 , soll so gewählt werden, dass der Flüssigphasenanteil z maximal wird (siehe Beschreibung im Text). **Äquivalent des Flüssigphasenanteils im T,h-Diagramm (b).** z entspricht der Strecke zwischen (3) und (3''), Hier gezeigt für ein Niederdruckniveau von 1 bar.

Abb. 3 a zeigt den Bilanzraum (gestrichelte Linie), der der Berechnung für die Auslegung des optimalen Hochdruckniveaus zugrunde liegt. Hier tritt der gasförmige Wasserstoff

nach der Vorkühlung mit Flüssigstickstoff ein (1). Seine spezifische Enthalpie $h_1(T_1, p_1)$ ist dabei definiert durch $T_1=77$ K (Siedetemperatur des Flüssigstickstoffs bei 1 bar) sowie den zu wählenden Hochdruck p_1 . Nach der Drosselung (2 \rightarrow 3) scheidet sich die flüssige Phase durch die Schwerkraft im LH2-Speichergefäß ab (3'). Der flüssige Wasserstoff liegt außerhalb des Bilanzraums. Nachdem der nicht verflüssigte Anteil im Gegenstromwärmeübertrager CF-HX 2 zur Vorkühlung des einströmenden Wasserstoffs genutzt wurde, verlässt auch dieser den Bilanzraum (4). Für die Berechnung des optimalen Hochdrucks müssen die spezifischen Enthalpien des abgeschiedenen LH2, $h_{3'}$, und des rückströmenden Wasserstoffs beim Austritt aus dem Bilanzraum, h_4 , bekannt sein. Der definierende Druck ergibt sich hierbei durch den eingestellten Niederdruck hinter dem Drosselventil (p_3). Wie bereits erwähnt, wurde für diesen eine Obergrenze von 5 bar gesetzt, während die untere Grenze durch den Umgebungsdruck von ca. 1 bar gegeben ist. Die spezifische Enthalpie $h_{3'}$ ergibt sich dann durch die Siedetemperatur des Wasserstoffs zum gewählten Niederdruck, die spezifische Enthalpie h_4 durch die Temperatur des Flüssigstickstoffs aus der Vorkühlung ($T_1 = T_4 = 77$ K), da ein optimaler Wärmeübergang im Gegenstromwärmeübertrager angenommen wird.

Im Linde-Hampson-Verfahren verrichtet das Gas während der Expansion keine Arbeit. Zudem wird angenommen, dass kein Wärmeaustausch mit der Umgebung stattfindet, was durch eine hinreichende thermische Isolierung näherungsweise gewährleistet werden muss. Folgende Aussagen können somit zu dem hier definierten thermodynamischen System getroffen werden:

$$\dot{W} = 0, \dot{Q} = 0 \Rightarrow \frac{dU_{sys}}{dt} = 0 = \dot{m}_1 h_1 - (\dot{m}_{3'} h_{3'} + \dot{m}_4 h_4) \quad (1)$$

$$\text{mit } z = \frac{\dot{m}_{3'}}{\dot{m}_1} \quad (2)$$

$$\text{und } \dot{m}_1 = \dot{m}_{3'} + \dot{m}_4. \quad (3)$$

Daraus ergibt sich für z :

$$z = \frac{h_4 - h_1}{h_4 - h_{3'}}. \quad (4)$$

Der optimale Hochdruck wurde durch die Berechnung des Flüssigphasenanteils z über einen technisch umsetzbaren Druckbereich ermittelt. 4 zeigt die Werte für z über den Druckbereich von 50 bis 250 bar, jeweils für Niederdruckniveaus von 1-5 bar. Das Maximum für z liegt für alle Niederdruckniveaus bei etwa 155 bar.

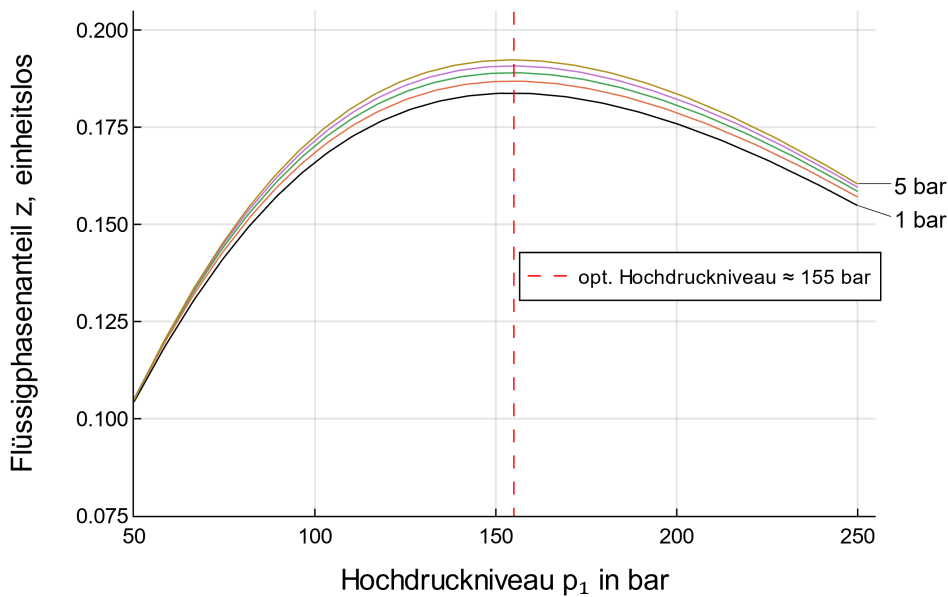


Abbildung 4: Flüssigphasenanteile z für Niederdruckniveaus von 1-5 bar. Dargestellt ist die Abhängigkeit von z vom gewählten Hochdruckniveau vor der Drosselung innerhalb des Linde-Hampson-Verfahrens. Das Maximum liegt für alle Niederdruckniveaus bei etwa 155 bar.

Tabelle 1 zeigt die theoretischen Maxima des Flüssigphasenanteils z für das jeweilige Niederdruckniveau. Zudem sind jeweils die Werte gegeben, die später durch das Simulationsmodell (siehe Abschnitt 3.1.3) berechnet wurden. Dementsprechend wurde die Anlage für ein Hochdruckniveau von 155 bar ausgelegt.

Niederdruckniveau	theoretisches Maximum für z	Vorhersage des Simulationsmodells
Hochdruckniveau von 155 bar		
1 bar	0,184	0,172
2 bar	0,187	0,173
3 bar	0,189	0,173
4 bar	0,191	0,172
5 bar	0,192	0,171

Tabelle 1: Berechnete Maximalwerte des Flüssigphasenanteils für verschiedene Niederdruckniveaus. Für alle betrachteten Niederdruckniveaus korreliert das Maximum für z mit einem Hochdruckniveau von etwa 155 bar. Demnach liegt die maximale Ausbeute gemessen in Kilogramm LH2 pro Kilogramm investiertem gasförmigem Wasserstoff zwischen 18-19 %, je nach Niederdruckniveau. Das Simulationsmodell (siehe Abschnitt 3.1.3) prognostizierte Werte im Bereich von etwa 17 %.

3.1.3 Simulationsbasierte Untersuchung des Prozesskonzepts

Nach der Konzeptionierung der Anlage und der Festlegung der Betriebsparameter wurde ein mathematisches Modell zur simulationsbasierten Untersuchung des Prozesses erstellt. Dafür wurden die Modellierungssprache Modelica sowie Software des Projektpartners TLK Thermo GmbH (im Folgenden TLK genannt) genutzt. Modelica ermöglicht eine gleichungsorientierte Beschreibung der Systemkomponenten des Verflüssigers sowie einen Export in andere Simulationswerkzeuge (z.B. Matlab, Python) basierend auf dem offenen FMI-Standard. TLK besitzt eine hohe Expertise in der Softwareentwicklung und dem Aufbau von Modellbibliotheken, wie der weltweit für die Berechnung von thermischen Energiesystemen eingesetzten Bibliothek TIL [TLK24]. Die TIL Suite besteht aus der Modellbibliothek TIL und der Stoffdatenbibliothek TILMedia.

Das Modell sollte zum einen die theoretische Machbarkeit des erstellten Anlagenkonzeptes demonstrieren. Zum anderen konnten auch Dimensionen für Bauteile wie Ventile und Wärmeübertrager mit dem Modell ausgelegt werden. Abb. 5 zeigt die grafische Darstellung des Modells auf der Benutzeroberfläche der Simulationssoftware Dymola. Werte der Temperaturen in Abb. 2 wurden durch eine Simulation dieses Modells über drei Stunden und mit einem Feedmassenstrom von 2 kg h^{-1} berechnet. Außerdem wurden die Flüssigphasenanteile für die möglichen Niederdruckniveaus von 1-5 bar durch Simulationen des Modells ermittelt. In Tabelle 1 (Abschnitt 3.1.2) sind die berechneten Maximalwerte des Flüssigphasenanteils den Vorhersagen des Modells gegenübergestellt.

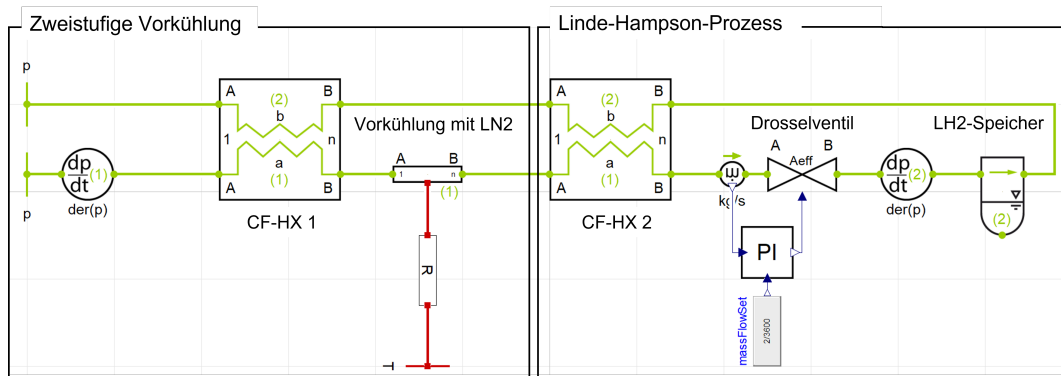


Abbildung 5: Grafische Darstellung des Prozessmodells auf der Benutzeroberfläche Dymola. Das Modell wurde u.a. zur Validierung des Prozesskonzepts und zur Dimensionierung von Bauteilen wie Wärmeübertragern und Ventilen genutzt.

3.2 Wärmeübertrager

Wie bereits in Abschnitt 3.1 erläutert, ist die Vorkühlung ein essentieller Teil des Linde-Hampson-Verfahrens zur Wasserstoffverflüssigung. In der hier vorgestellten Anlage werden dafür Kupferrohr-Wärmeübertrager aus desoxidiertem Kupfer (Cu-DHP) eingesetzt. Für den Kontakt mit Wasserstoff ist die Wahl von Cu-DHP entscheidend, da nur die desoxidierte Form des Kupfers robust gegen Wasserstoffversprödung ist [KME21].

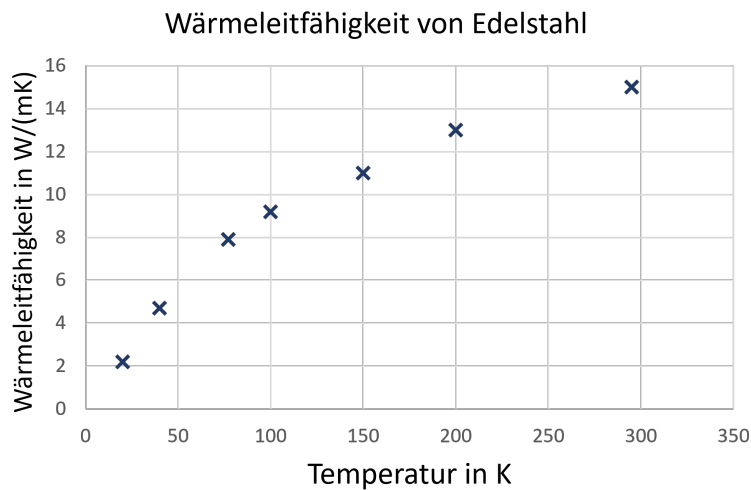
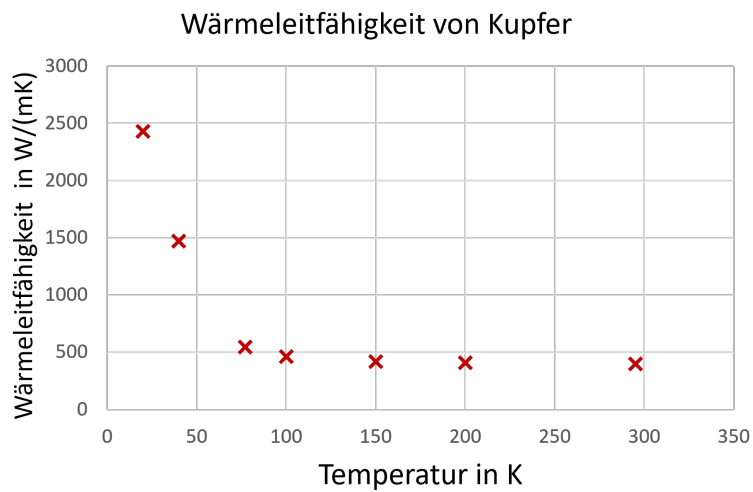


Abbildung 6: Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der Temperatur für Kupfer und Edelstahl. Kupfer besitzt eine deutlich höhere Wärmeleitfähigkeit als Edelstahl über den gesamten Temperaturbereich. Bei Temperaturen unterhalb von 50 K steigt die Wärmeleitfähigkeit des Kupfers an, während die des Edelstahls abnimmt.

Kupfer besitzt äußerst vorteilhafte Eigenschaften für die Wärmeübertragung aufgrund seiner hohen thermischen Leitfähigkeit, die mit abnehmender Temperatur sogar steigt [HPL72]. Abb. 6 zeigt die Wärmeleitfähigkeiten von Kupfer und Edelstahl. Schon bei Umgebungstemperaturen liegt die Wärmeleitfähigkeit des Kupfers mit 397,0 W/(mK) deutlich höher als die des Edelstahls mit 15,0 W/(mK). Für Temperaturen unterhalb von 50 K steigt sie dann stark an und liegt bei 20 K schließlich bei 2430,0 W/(mK) im Gegensatz zur verringerten Wärmeleitfähigkeit des Edelstahls mit 2,2 W/(mK).

Desoxidiertes Kupferrohr ist im Handel relativ preisgünstig erhältlich und aufgrund seiner geringen Härte bei gleichzeitig hoher Duktilität besonders gut zur Kaltumformung geeignet. Die Wärmeübertrager des Wasserstoffverflüssigers wurden daher aus Kupferrohr angefertigt. Mit Hilfe des Simulationsmodells (siehe Abschnitt 3.1.3) konnte berechnet werden, dass die handelsübliche Länge von 25 m Kupferrohr für die Wärmeübertragung ausreicht. Die Berechnung des Wärmeübergangs wurde unter Nutzung der hier anwendbaren Wärmeübergangsbeziehungen mit einem konstanten α -Wert von $250 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ durchgeführt [VV02].

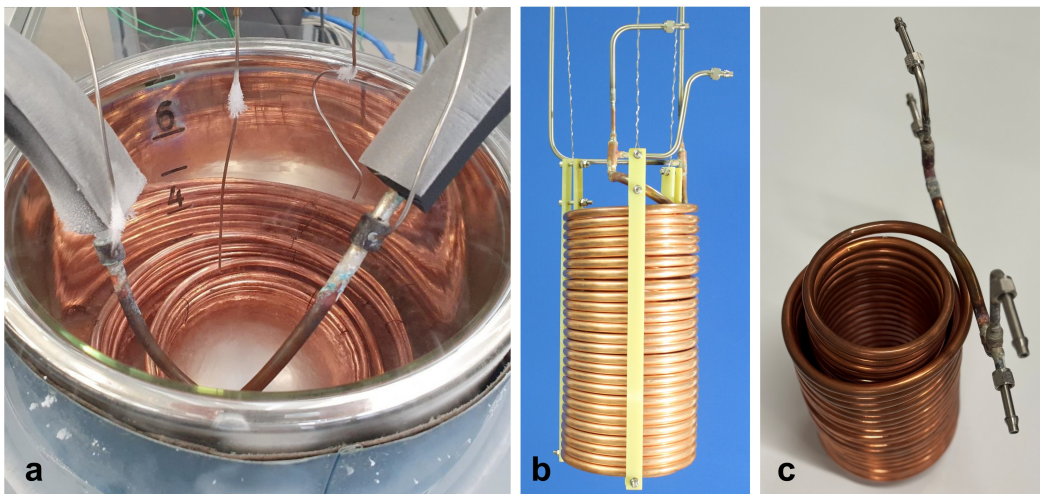


Abbildung 7: Wärmeübertrager aus Kupferrohr. Ein einfacher Rohrwärmeübertrager aus desoxidiertem Kupfer (Cu-DHP) wird in der Vorkühlung mit Flüssigstickstoff eingesetzt (a). Die Gegenstromwärmeübertrager CF-HX 2 (b) und CF-HX 1 (c) bestehen aus zwei ineinander geschobenen Kupferrohren (Cu-DHP).

Der Wärmeübertrager für die Vorkühlung im Flüssigstickstoffbad wurde aus einem Kupferrohr mit 6 mm Durchmesser und 1 mm Wandstärke gefertigt, das zu einer Doppelspirale aufgewickelt wurde (siehe Abb. 7). In der ersten Auslegung der Anlage war nur ein Gegenstromwärmeübertrager hinter dem Flüssigstickstoffbad vorgesehen. Dazu sollte ein Kupferrohr mit 6 mm Durchmesser in ein Kupferrohr mit 12 mm Durchmesser (beide mit 1 mm Wandstärke) geschoben werden. Im ersten Versuch gelang dies nicht, da sich die Rohre verkanteten - es wurden lediglich 19 m erreicht. In einem zweiten Versuch, bei dem Werkzeuge zur Rohrbegradigung eingesetzt wurden, konnte schließlich ein 25 m langer Gegenstromwärmeübertrager (CF-HX 2, siehe Abb. 2) hergestellt werden. Der 19 m lange Wärmeübertrager wurde anschließend als zusätzliche Vorkühlstufe vor dem Flüssigstickstoffbad in die Prozessplanung integriert (CF-HX 1). Beide Gegenstromwärmeübertrager wurden zu Doppelspiralen aufgewickelt (siehe Abb. 7).

Nach der Fertigung der Wärmeübertrager aus Kupferrohr wurden Rohrabschnitte aus Edelstahl an die Enden der Wärmeübertrager gelötet. Diese konnten dann mittels Rohrverschraubungen mit den Edelstahlleitungen der Anlage verbunden werden. Durch die kryogenen Temperaturen im späteren Betrieb sind die Lötverbindungen besonderen Belastungen ausgesetzt. [Eki06] verweist auf verschiedene Silberhartlote, die sich für die Verbindung von Kupfer und Edelstahl in der Kryotechnik eignen. Hier wurde ein Silberhartlot vom Typ Ag 156 nach DIN EN ISO 17672 verwendet [Arm]. Abb. 8 zeigt beispielhaft die Lötverbindungen am Gegenstromwärmeübertrager CF-HX 2.

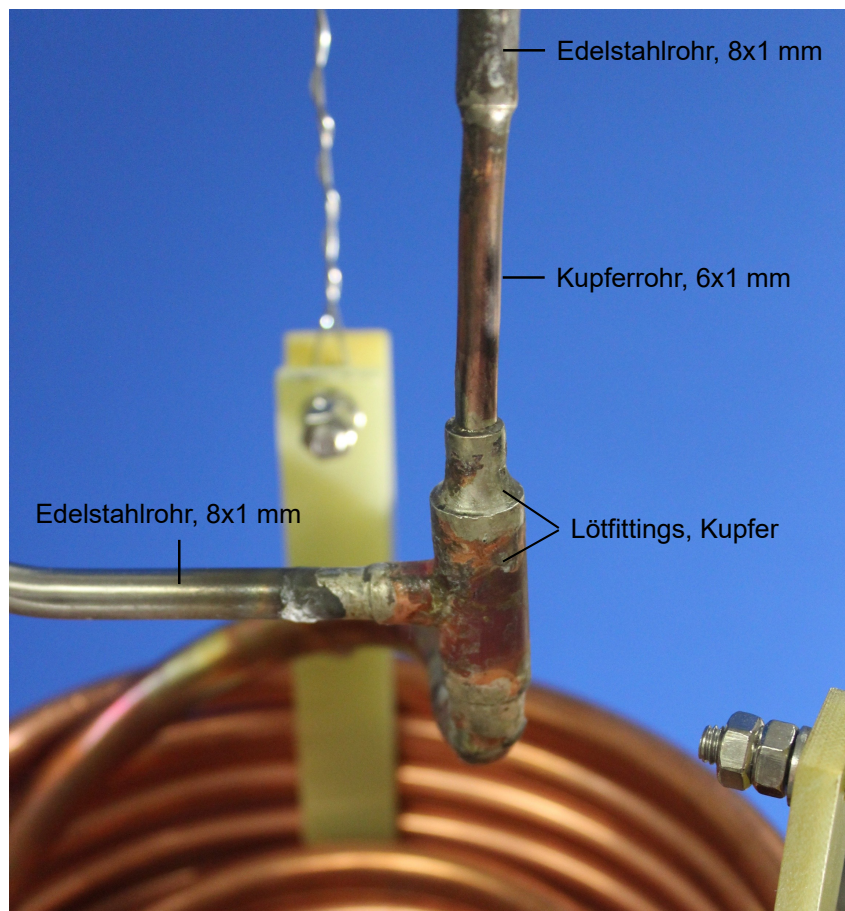


Abbildung 8: Lötverbindungen zwischen dem Kupferrohr des Gegenstromwärmeübertragers und Edelstahlrohren. Verwendet wurde ein Silberhartlot vom Typ Ag 156 nach DIN EN ISO 17672 [Arm].

3.3 Speicherung des LH2

Wie bereits im Abschnitt 3.1.1 beschrieben, wurden 20 l Speichervolumen für den dezentralen Verflüssiger festgelegt. Aufgrund der kryogenen Bedingungen muss hierbei berücksichtigt werden, dass der Druck im LH2-Speicher durch verdampfenden Wasserstoff steigen kann. Der hier konzipierte LH2-Speicher ist daher für Drücke bis zu 10 bar zugelassen. Für Druckgeräte und Baugruppen mit einem maximal zulässigen Druck von

0,5 bar Überdruck gegenüber dem Umgebungsdruck gilt bereits die Druckgeräterichtlinie [Eur14]. Dazu zählt, dass eine notifizierte Prüfstelle ein Bauteil, das unter diese Richtlinie fällt, prüfen muss. Geeignete Speichertanks der gewünschten Dimensionen und Anforderungen waren auf dem Markt nicht verfügbar. Daher wurde die Herstellung des LH2-Speichers öffentlich ausgeschrieben. Der LH2-Speicher sollte in der geplanten Vakuumkammer (siehe Abschnitt **Thermische Isolierung**) aufgehängt werden. Zudem sollten diverse Anschlüsse des LH2-Speichers über die Vakuumkammer nach außen geführt werden (siehe A1/2). Vakuumkammer und LH2-Speicher wurden daher als eine Einheit ausgeschrieben. Der Auftrag wurde an die Firma CryoEx vergeben. Für die LH2-Entnahme wurde im LH2-Speicher ein Heizer vorgesehen, der durch kontrolliertes Verdampfen des LH2 für einen Druckanstieg sorgt. Durch ein Steigrohr wird dann LH2 aus dem Speicher in die Entnahmeleitung gedrückt. Der Massenstrom der Entnahme soll dabei durch ein Ventil regelbar sein. An der Vakuumkammer wurde zudem ein Anschluss für vakuumisolierte Leitungen zur Entnahme des tiefkalten LH2 vorgesehen.

3.4 Thermische Isolierung

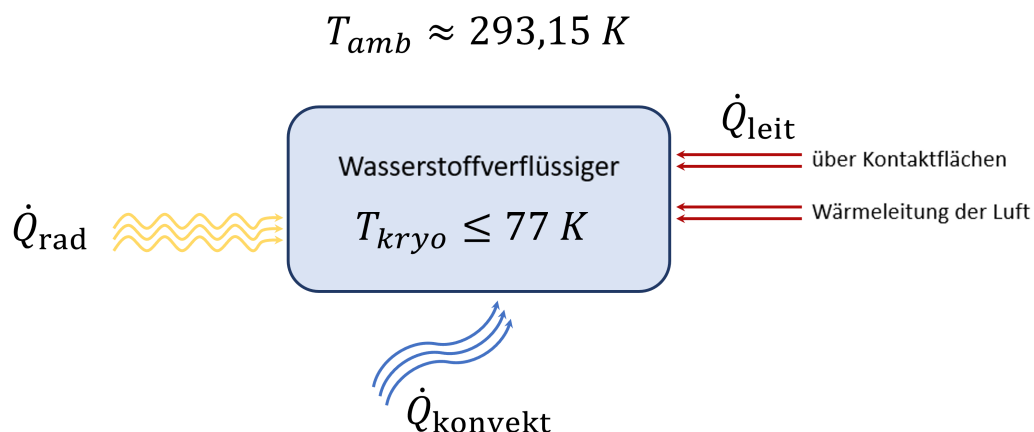


Abbildung 9: Wärmeeinträge in den kryogenen Prozessabschnitt. Wärmeleitung (\dot{Q}_{leit}) findet an Kontaktflächen der tiefkalten Bauteile zu wärmeren Bauteilen statt (Rohrverbindungen, Aufhängungen, etc.). Auch die Wärmeleitung der Luft sorgt bei den hohen Temperaturdifferenzen für einen relevanten Wärmeeintrag in das System. Durch Luftströmungen ergeben sich zudem konvektive Wärmeeinträge, während Wärmestrahlung von Flächen in der Umgebung ausgeht, die eine Temperatur größer T_{kryo} aufweisen.

Aufgrund der hohen Temperaturdifferenzen von Flüssigwasserstoff (20 K bei 1 bar) zur Umgebung ist eine sehr gute thermische Isolierung der tiefkalten Bauteile erforderlich, um Wärmeeinträge in das System zu verringern. Abb. 9 zeigt die verschiedenen Wärmepfade in den Abschnitt der Anlage, in dem kryogene Temperaturen vorherrschen. Quellen für Wärmeeinträge sind:

- Wärmeleitung über Kontaktflächen der Bauteile
- Wärmeleitung der Luft
- konvektive Wärmeströme durch Luftbewegung in der Umgebung
- Wärmestrahlung

Konvektive Wärmeeinträge und Wärmeleitung durch die Luft lassen sich durch Vakuumisolierung der betreffenden Bauteile deutlich verringern. Innerhalb des Vakuums können diese Bauteile dann durch eine sogenannte Superisolation (engl. Multilayer Insulation, MLI) zusätzlich vor Wärmestrahlung geschützt werden. Diese beiden technischen Lösungen werden im Folgenden näher erläutert.

3.4.1 Vakuumisolierung



Abbildung 10: Vakuumkammer. Zur Reduktion der Wärmeeinträge in die kryogene Prozessstrecke durch Konvektion und Wärmeleitung der Luft werden der Gegenstromwärmeübertrager CF-HX 2, das Drosselventil und das LH2-Speichergefäß durch ein Hochvakuum isoliert. Die Vakuumkammer ist für einen Betriebsdruck von 10^{-5} mbar ausgelegt. In den beiden vertikalen Kammerteilen werden der Wärmeübertrager und das LH2-Speichergefäß aufgehängt. Das Drosselventil ist hier im Bild bereits eingesetzt.

In einem technischen Hochvakuum (Drücke zwischen 10^{-3} und 10^{-3} mbar) ist die Anzahl der Gasteilchen, die Wärmeenergie durch Konvektion oder Leitung übertragen können, drastisch reduziert [Int]. In der hier vorgestellten Anlage wurden daher der zweite Gegenstromwärmeübertrager CF-HX 2 (siehe Abb. 2), das Drosselventil, das LH2-Speichergefäß sowie alle verbindenden Rohrleitungen innerhalb einer Vakuumkammer installiert (Abb. 10), die von der Firma CryoEx für das DEWAS-Projekt hergestellt wurde. Die Bauteile wurden dabei mit möglichst kleinen Kontaktflächen zur Außenwand der Vakuumkammer angebracht. Abb. 7 zeigt beispielsweise die Aufhängung des Gegenstromwärmeübertragers. Direkten Kontakt hat der Wärmeübertrager nur zu Glasfaserstäben, die eine äußerst geringe Wärmeleitfähigkeit besitzen. Über Drähte sind diese dann mit dem Deckel der Vakuumkammer verbunden.

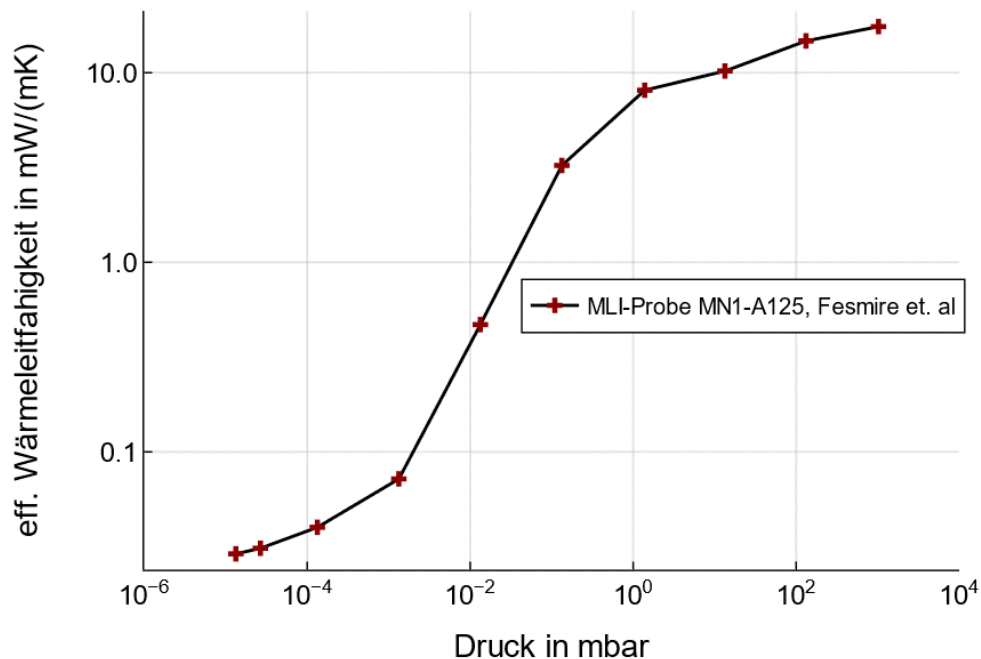


Abbildung 11: Effektive Wärmeleitfähigkeit einer MLI-Probe in Abhängigkeit vom Druck innerhalb einer Vakuumisolierung. Ein rascher Anstieg der effektiven Wärmeleitfähigkeit bei Drücken zwischen 10^{-4} mbar und 10^{-4} mbar ist erkennbar. Die Daten stammen aus [FJ18].

Durch eine Literaturrecherche wurde ermittelt, welcher Vakuumdruck eine ausreichende Isolierung gewährleistet. In [FJ18] wurde die effektive Wärmeleitfähigkeit verschiedener MLI-Typen in Abhängigkeit vom Vakuumdruck untersucht. Dazu wurde ein vakuumisolierter Flüssigstickstofftank mit den verschiedenen MLI-Proben umwickelt und der Druck variiert. Aus der Verdampfungsrate des Stickstoffs wurde die effektive Wärmeleitfähigkeit

berechnet. Abbildung 11 zeigt das Ergebnis für eine MLI-Probe, die der hier verwendeten MLI ähnlich ist. Die Kurve zeigt einen raschen Anstieg der effektiven Wärmeleitfähigkeit bei Drücken zwischen 10^{-4} mbar und 10^{-4} mbar. Um diesen kritischen Bereich mit deutlich höheren Wärmeeinträgen in das System zu vermeiden, wurde als Spezifikation für die Vakuumkammer ein Druck von 10^{-5} mbar festgelegt. Technische Zeichnungen der Vakuumkammer mit Details zu den Abmaßen und Anschlüssen finden sich im Anhang (A1).

3.4.2 Multilayer Insulation (MLI)

Während des Prozesses der Wasserstoffverflüssigung sorgt das Hochvakuum für eine Minimierung der Wärmeeinträge durch Leitung und Konvektion. Für die zusätzliche Reduktion von Wärmeeinträgen durch Strahlung wurde eine sogenannte Superisolation (engl. Multilayer Insulation, MLI) verwendet. Der Einsatz von MLI zur Abschirmung von Bauteilen vor Wärmestrahlung ist in der Raumfahrt sowie der Kryotechnik geläufig. Das Material besteht aus mehreren Lagen strahlungsisolierender metallbedampfter Kunststofffolien, die durch Zwischenlagen voneinander getrennt sind. Die Zwischenlagen besitzen eine geringe Wärmeleitfähigkeit und minimieren so den Wärmetransport durch Leitung innerhalb der strahlungsisolierenden Schichten. Für Beschaffung und Anbringung der MLI wurde die Firma CryoEx, die auch Vakuumkammer und LH₂-Speicher geliefert hat, beauftragt. Die fachgerechte Anbringung der MLI wurde durch einen Mitarbeiter von CryoEx demonstriert.

Ein sogenanntes MLI-Sheet oder -Blanket der gelieferten Produktart (Hersteller Soditech) besteht aus zehn Lagen aluminisiertem PET mit 12 µm Dicke und neun Lagen PET-Spacer. Um eine hinreichende Isolierung zu gewährleisten, wurden die Bauteile in der Vakuumkammer mit mehreren Lagen der MLI-Blankets umwickelt: an den Wärmeübertrager und den LH₂-Speichertank wurden jeweils drei Lagen angebracht, an den Schaft des Drosselventils und die Rohrleitungen jeweils zwei.

Alle Bauteile innerhalb der Vakuumkammer haben eine zylindrische Form (Wärmeübertrager, LH₂-Speichertank, Rohrleitungen, Ventilschaft), sodass die Ränder jedes MLI-Zuschnitts bei der Wicklung aufeinander treffen. Hierbei ist es wichtig, die MLI nicht mit einer einfachen Überlappung anzubringen (siehe Abb. 12, A), denn dadurch würde die innere Schicht direkt auf der äußeren Schicht liegen und es käme zur Wärmeleitung zwischen den beiden Schichten, noch begünstigt durch die verbesserte Wärmeleitfähigkeit von Aluminium bei tiefen Temperaturen [HPL72]. Der Effekt der MLI, der durch die Spacer und eine geringe Temperaturdifferenz benachbarter Schichten gewährleistet ist, ginge dadurch verloren. Vermieden wird dies durch eine isotherme Lagen- oder Einzelüberlappung (Abb. 12, B und C).

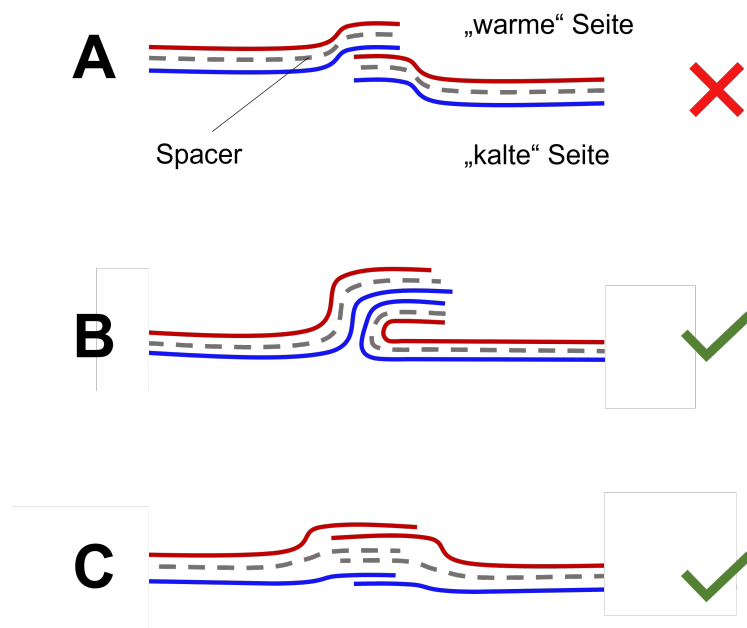


Abbildung 12: Techniken der MLI-Anbringung. Vereinfachend sind hier nur zwei isolierende Schichten (rot, blau) und eine Spacerschicht dargestellt. Eine nicht-isotherme Überlappung (A) ist zu vermeiden, weil dabei „kalte“ und „warme“ Seite direkt aufeinanderliegen und es zur Wärmeleitung zwischen den Schichten kommt. Alternativen sind die isotherme Lagenüberlappung (B) oder die isotherme Einzelüberlappung (C). Für den dezentralen Verflüssiger wurde die Technik der isothermen Lagenüberlappung angewandt.

Für die hier beschriebene Anlage wurde die Methode der Lagenüberlappung gewählt, da sie deutlich zeitsparender bei gleichzeitig gewährleisteter Isolation für den Anwendungsfall der Wasserstoffverflüssigung ist. Aus dem MLI-Blanket wurde dafür ein passendes Stück ausgeschnitten, in dem das Bauteil mit ausreichend Überstand eingeschlagen werden konnte. Auch am oberen und unteren Ende wurden Schnitzzugaben vorgesehen, um die MLI hier später zu verschließen. Der Zuschnitt wurde dann um das Bauteil gelegt, sodass die Innenflächen jeweils aufeinandertrafen, und der Überstand dann seitlich umgeklappt (siehe Abb. 13). Für die Fixierung wurde ein einfaches, aluminisiertes Klebeband verwendet, das auf der gesamten Länge der Verbindungsstelle aufgeklebt wurde. Dieser Vorgang wurde wiederholt, bis die gewünschte Anzahl an MLI-Lagen am Bauteil angebracht war. Hierbei wurde beachtet, dass die Verbindungsstelle eines MLI-Blankets nicht direkt auf der des zuvor angebrachten Blankets liegt, da die Verbindungsstellen Verdickungen bilden, die gleichmäßig über den Umfang des Bauteils verteilt werden sollten. Nach Anbringung aller Blankets am Wärmeübertrager und LH2-Speichertank wurden die Überstände am oberen Ende so eingeschnitten, dass sie um die jeweiligen Anschlüsse gelegt und verklebt werden konnten. Kleine Öffnungen oder herausstehende Spacerschichten wurden mit Klebeband verschlossen. An den unteren Enden, frei von Anschlüssen, wurde der Überstand schrittweise zusammengenommen, sodass die innere Schicht aneinander gedrückt wurde, seitlich hochgeklappt und verklebt. Durch

die Wiederholung dieses Vorgangs wurde die Öffnung ohne einen Kontakt der inneren und äußeren Schichten geschlossen (siehe Abb. 14). An Verbindungsstellen zwischen Rohrleitungen und Bauteilen wurden die aufeinander treffenden MLI-Blankets mit aluminisiertem Klebeband fixiert.

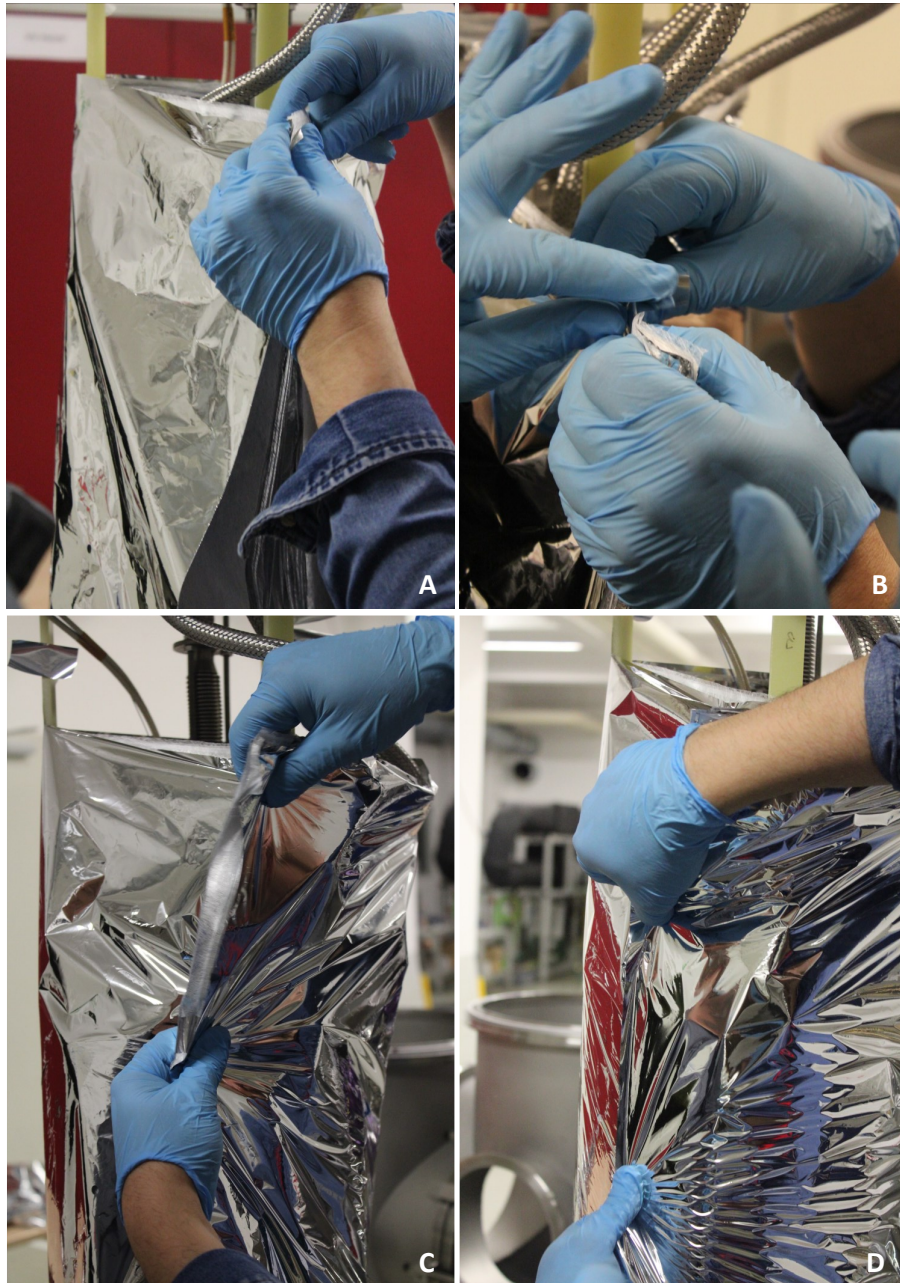


Abbildung 13: Wicklung des LH₂-Speichers mit der Methode der Lagenüberlappung. Das MLI-Blanket wird um das Bauteil gelegt und an der Verbindungsstelle mit Klebeband fixiert (A und B). Der Überstand wird dann umgeklappt (C und D) und verklebt (nicht im Bild gezeigt).

Die Umwicklung mit MLI gewährleistet nach Kenntnissen aus Industrie und Forschung eine sehr gute Isolierung gegen Wärmestrahlung. Die Projektmitarbeiter der TU Braunschweig und der TLK Thermo GmbH konnten die Methoden zur Anbringung der MLI selbst anwenden und sind somit auch für zukünftige Projekte im Bereich der Kryotechnik geschult worden.



Abbildung 14: Verschießen des unteren MLI-Überstands an Wärmeübertrager und LH2-Speichertank. Um die Unterseite zu verschließen (nach dem Anbringen aller MLI-Blankets) werden wiederholt Abschnitte des unteren Überstands umgeklappt und mit Klebeband fixiert (A und B). Ein Kontakt zwischen äußerer und innerer Schicht wird vermieden.

3.5 Ortho-Para-Katalyse

Im häufigsten Isotop des Wasserstoffs, Protium, besteht der Atomkern nur aus einem Proton. Molekularer Wasserstoff, bestehend aus zwei Protium-Atomen, besitzt zwei verschiedene Kernspinkonfigurationen. Die Protonenspins der beiden Atome im Molekül können entweder parallel oder antiparallel zueinander ausgerichtet sein. Im ersten Fall spricht man von Ortho-Wasserstoff (o-H₂), im zweiten von Para-Wasserstoff (p-H₂). Die beiden sog. Kernspin-Isomere des Wasserstoffs unterscheiden sich physikalisch u.a. in ihrer spezifischen Wärmekapazität und der thermischen Leitfähigkeit. [Lea+09; Ess07] Das Verhältnis von o-H₂ zu p-H₂ ist temperaturabhängig. Bis zu einer Temperatur von etwa 250 K liegt das Gleichgewicht bei 75 % o-H₂ zu 25 % p-H₂. Diese Zusammensetzung wird auch Normalwasserstoff (n-H₂) genannt. Je weiter die Temperatur sinkt, desto mehr verschiebt sich dieses Gleichgewicht in Richtung des p-H₂. Bei der Siedetemperatur des Wasserstoffs (20 K, 1 bar) beträgt der Gleichgewichtsanteil des p-H₂ schließlich nahezu 100 % (siehe Abb. 15).

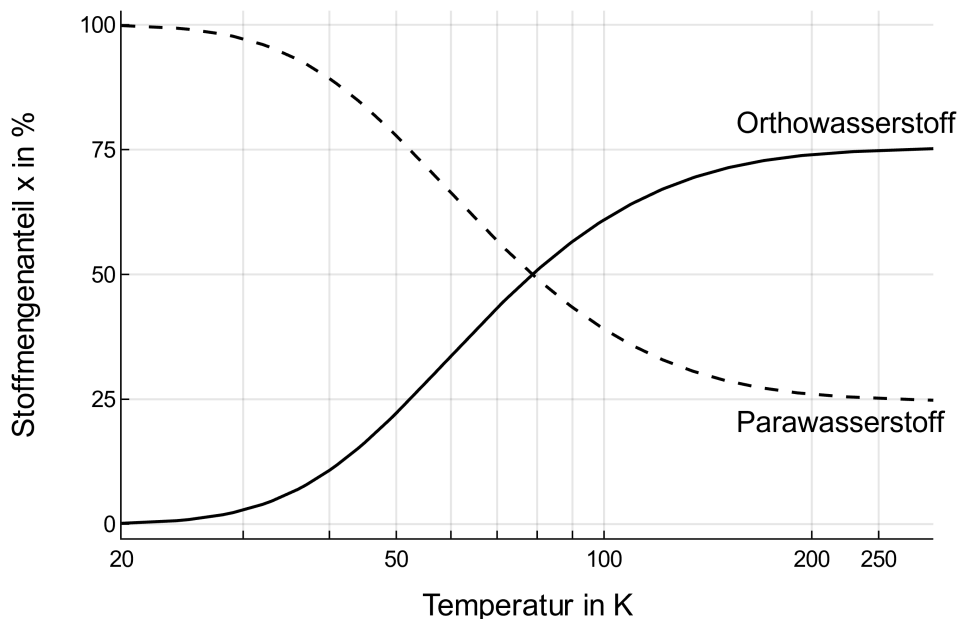


Abbildung 15: Temperaturabhängige Ortho-Para-Zusammensetzung des Wasserstoffs. Bis etwa 250 K liegt das Gleichgewicht bei 75 % o-H₂ zu 25 % p-H₂. Je weiter die Temperatur sinkt, desto mehr verschiebt sich dieses Gleichgewicht in Richtung des p-H₂.

Die Reaktion von o-H₂ zu p-H₂ erfolgt allerdings zeitverzögert zur Temperaturabnahme. Zudem ist die Reaktion exotherm, da o-H₂ auf einem höheren Energieniveau liegt. Abb.

16 zeigt den Verlauf der Umwandlungsenthalpie des n-H₂ in den jeweiligen Gleichgewichtswasserstoff (e-H₂) in Abhängigkeit von der Temperatur bei 1 bar (diese Umwandlung entspricht der Reaktion oH₂ → pH₂). In rot ist zudem die Verdampfungsenthalpie des n-H₂ bei diesem Druck dargestellt. Erkennbar ist, dass die Umwandlungsenthalpie nH₂ → eH₂ ab ca. 30 K größer ist als die Verdampfungsenthalpie des nH₂. Eine zeitverzögerte Umwandlung im flüssigen Wasserstoff (20 K bei 1 bar) führt also zur Verdampfung des LH₂. Wasserstoffgas müsste letztendlich abgelassen werden, um den zulässigen Druck im Tank nicht zu überschreiten. Die Verluste sind zum ökonomischen und ökologischen Nachteil - um sie zu verhindern oder zumindest zu begrenzen, kann die Ortho-Para-Umwandlung bereits während der Vorkühlung katalytisch beschleunigt werden. [Ess07]

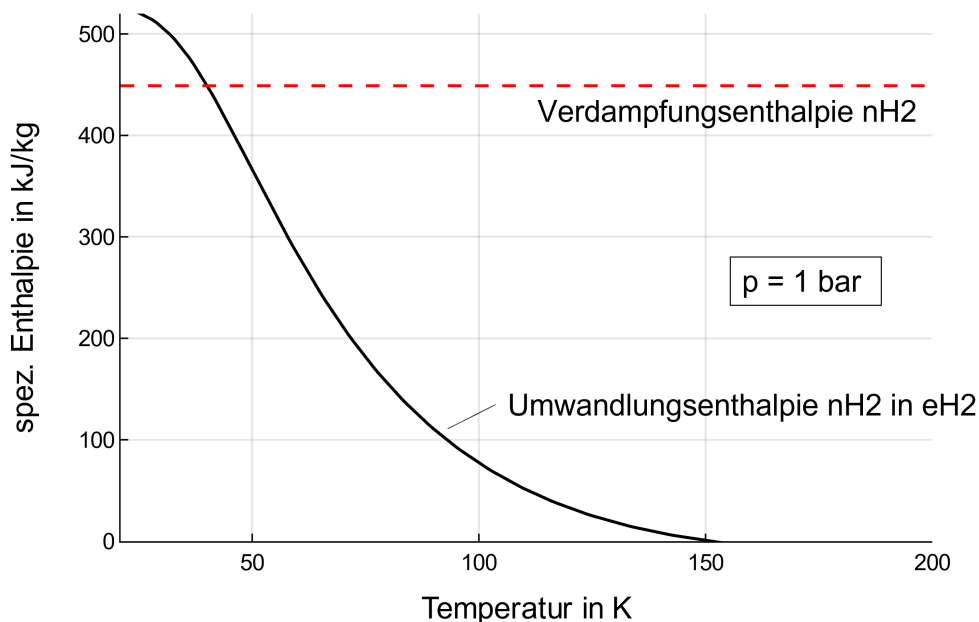


Abbildung 16: Temperaturabhängige Umwandlungsenthalpie von Normal- zu Gleichgewichtswasserstoff (nH₂ → eH₂). Ab ca. 30 K liegt die Umwandlungsenthalpie nH₂ → eH₂ über der Verdampfungsenthalpie des nH₂ bei 1 bar (rote Linie).

Ein geeigneter Katalysator ist u.a. das paramagnetische Eisen(III)-oxid [Ess07]. Hierbei bewirken Wechselwirkungen des magnetischen Feldes des Katalysatormaterials mit dem Magnetfeld des Wasserstoffmoleküls die Änderung der Kernspinkonfiguration. Um den Verflüssiger kosten- und ressourcenschonend zu betreiben, soll die Katalyse mit Eisen(III)-oxid (siehe Abb. 17) in die Vorkühlungsstrecke integriert werden. Abschnitte des Wärmeübertragers im Flüssigstickstoffbad sollen dafür mit dem Katalysatorpulver

befüllt werden. Dadurch könnte die freigesetzte Umwandlungswärme durch das Flüssigstickstoffbad abgeführt werden. Ähnliche Konzepte werden auch in großskaligen Anlagen zur Wasserstoffverflüssigung umgesetzt [Umb; FT65].



Abbildung 17: Eisen(III)-oxid als Katalysator der Ortho-Para-Umwandlung. Die katalytische Reaktion basiert auf paramagnetischen Wechselwirkungen zwischen dem Eisen(III)-oxid und dem Wasserstoffmolekül. Das hier gezeigte Eisen(III)-oxid-Pulver wurde von Ranido bezogen.

3.6 Sicherheitskonzept

Drei Gefahrenfelder sind im Zusammenhang mit der Anlage zur dezentralen Wasserstoffverflüssigung besonders relevant:

- **Chemisches Reaktionsvermögen von Wasserstoff:** Wasserstoff bildet mit Luft im Bereich von 4-18 Vol.-% ein zündfähiges und von 18-75 Vol.-% ein explosionsfähiges Gemisch [Zab64; Yan+21]. Selbst kleinste Aktivierungsenergien, wie z.B. elektrostatische Entladungen, genügen, um solche Wasserstoff-Luft-Gemische zu entzünden. Bei Kontakt mit Feststoffen kann Wasserstoff außerdem in das Teilchengefüge eindringen und für Versprödung der Materialien sorgen [Cot61]. Die mechanische Integrität der Materialien wird herabgesetzt, wodurch wiederum das Risiko für eine Leckage des Wasserstoffs aus der Anlage steigt.
- **Druck:** Teile der Prozessstrecke führen Gas unter Hochdruck (bis zu 155 bar). Berstende Druckbehälter oder Rohrleitungen stellen daher ein weiteres Gefahrenpotential dar.

- **Kryogene Temperaturen:** Im Fehlerfall kann extrem kalter Wasserstoff (bis 20 K bzw. -253 °C) aus der Anlage entweichen und zu Kontakterfrierungen führen. Sollte die thermische Isolierung durch Verlust des Vakuums unterbrochen werden, verdampft LH2 zudem äußerst schnell. Dies würde einen starken Anstieg des Drucks in der Anlage und eine lokal erhöhte Wasserstoffkonzentration verursachen.

Aufgrund dieser Gefahrenpotentiale fällt der Wasserstoffverflüssiger unter die EU-Richtlinie 2014/68/EU, die sogenannte Druckgeräterichtlinie, die Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV) sowie die Gefahrstoffverordnung (GefStoffV). Diese drei Normen stellen die rechtliche Grundlage für das Sicherheitskonzept der Anlage dar [BD22].

Die BetrSichV fordert eine umfangreiche Gefährdungsbeurteilung [Bun15]. Innerhalb der dazu erfolgten Gefahrenanalyse wurde für den dezentralen Verflüssiger eine FMEA (Failure Mode and Effect Analysis) in Kombination mit einer FTA (Fault Tree Analysis) und einer ETA (Event Tree Analysis) erstellt. Im Folgenden wird kurz das Vorgehen erläutert:

- **FMEA:** Potentielle Fehlerquellen in Komponenten oder Prozessen sollen frühzeitig erkannt werden. Jede Komponente im System der Anlage wurde hinsichtlich möglicher Fehler oder Ausfälle analysiert und die Auswirkungen auf das Gesamtsystem wurden eingeordnet. Die FMEA wurde in Tabellenform erstellt und während der Prozessplanung iterativ angepasst.
- **FTA:** Die FTA dient u.a. der Visualisierung von Fehlerquellen und liegt als Baumdiagramm vor. Hier wurde ausgehend vom möglichen Fehler analysiert, welche Kombination an Ursachen den Fehler auslösen kann.
- **ETA:** Mit der ETA wird untersucht, welche Ereignisse durch einen bestimmten Fehler ausgelöst werden können. Die möglichen Ereignisse wurden anhand ihrer Folgeschwere und der Wahrscheinlichkeit ihres Auftretens eingeordnet. Sie liegt, wie die FTA, als Baumdiagramm vor.

In die Gefährdungsbeurteilung wurden dann alle identifizierten Gefahrenquellen und die getroffenen Sicherheitsmaßnahmen aufgenommen. Das Sicherheitskonzept wurde dabei anhand der technischen Regeln für Gefahrstoffe (TRGS) und der technischen Regeln für Betriebssicherheit (TRBS) erstellt [Aus21; Aus19]. Vor der Inbetriebnahme muss eine zugelassene Zertifizierungsstelle prüfen, ob die rechtlichen Auflagen erfüllt sind. Mit der sicherheitstechnischen Begleitung sowie der letztendlichen Abnahme der Anlage wurde die TÜV SÜD AG beauftragt.

3.7 Diskussion und Bewertung der Ergebnisse

Im DEWAS-Projekt wurden wichtige Meilensteine auf dem Weg zur Errichtung einer Infrastruktur für die dezentrale Versorgung mit LH2 erreicht, obgleich der Prototyp des Wasserstoffverflüssigers nach dem Linde-Hampson-Prinzip bis zum Projektende nicht vervollständigt werden konnte. Die Arbeitspakete des Projekts waren laut Antragsstellung in drei Phasen eingeteilt: Konzeptphase, Entwurfsphase und Prototypphase. Abweichungen von den gesetzten Zielen sind teilweise in der Entwurfsphase, vor allem aber in der Prototypphase zu verzeichnen. In Bezug auf die Arbeitspakete, die im Projektantrag vom 01.06.2022 benannt wurden, lassen sich diese Abweichungen wie folgt zusammenfassen:

- **Entwurfsphase**

- **Arbeitspaket 2.3, Entwurf des Prototyps und Materialbeschaffung:** Ein Großteil der Anlage wurde bis zum Projektende technisch umgesetzt, jedoch konnten nicht alle Komponenten der Anlage beschafft werden.

- **Prototypphase**

- **Arbeitspaket 3.1, Aufbau des Prototyps und Machbarkeitsdemonstration:** Da zum Ende des Projekts noch Komponenten der Anlage fehlten, konnte der Verflüssiger nicht in Betrieb genommen werden.
- **Arbeitspaket 3.2, Untersuchung des Prototyps:** Aufgrund der nicht erfolgten Inbetriebnahme, konnte der Prototyp bisher nicht untersucht werden.

Ursachen für die o.g. Abweichungen sind im Wesentlichen die folgenden Punkte:

1. **Finanzierung:** Die Kosten für den Bau des Verflüssigers wurden bei der Beantragung des Projekts zu niedrig eingeschätzt. Am 17.05.2023 wurde daher bereits ein Nachbewilligungsantrag gestellt. Nach der Genehmigung des Antrags ergab sich die folgende finanzielle Aufstellung:

	Finanzierung laut Projektantrag	Finanzierung durch Nachbewilligung	Gesamt
Gesamtkosten	150.000 €	50.000 €	200.000 €
Fördersumme	120.000 €	24.000 €	144.000 €
Eigenanteil	30.000 €	26.000 €	56.000 €

Tabelle 2: Projektfinanzierung

Dabei waren die tatsächlichen Sachkosten für das Projekt deutlich höher als angenommen. Tabelle 3 zeigt eine Gegenüberstellung der ursprünglich kalkulierten Ausgaben für Sachmittel mit den tatsächlich entstandenen Kosten bzw. den durch intensivere Marktrecherche angepassten Kalkulationen:

	Kalkulation	tatsächlicher Wert / angepasste Kalkulation
Versorgung mit Prozessgasen für Inbetriebnahme und Tests	10.000 €	740 €
Wärmeübertrager	4.150 €	1.340 €
Drosselventil	4.700 €	5.840 €
Vakuumkammer mit LH2-Speicher	20.000 €	97.580 €
Messtechnik und Aktuatorik	5.645 €	ca. 24.500 €
MLI-Isolation	—	3.000 € (Material und Anbringung)
Zertifizierung durch Prüfgesellschaft	—	ca. 17.000 €

Tabelle 3: Gegenüberstellung der geplanten und realen Sachkosten.

Hierbei ist zu beachten, dass bis zum Projektende nicht alle oben aufgeführten Sachkosten bereits aufgebracht worden sind. Die Fertigstellung der Anlage wird nach dem Ende des Projekts aus anderen Mitteln finanziert.

Im Antrag wurden die Kosten für die Versorgung mit Prozessgasen in der Testphase höher veranschlagt, da ursprünglich eine Inertisierung mit Helium geplant war. Durch die eigene Herstellung aus relativ günstigen Grundkomponenten war auch der Preis für die Wärmeübertrager niedriger als vorhergesehen. Die übrigen Sachkosten lagen jedoch deutlich über den ursprünglichen Schätzungen. Grund für die erheblichen Abweichungen der Kosten von Messtechnik und Vakuumkammer waren einerseits die generellen, branchenübergreifenden Preissteigerungen zwischen 2022 und 2024. Andererseits ließ sich auch das ursprünglich ange dachte Prozesskonzept nicht darstellen und musste überarbeitet werden. In der ersten Auslegung für die Antragsstellung war die Vakuumisolation nur für die Speicherung des LH2 geplant. Im Verlauf des Projekts wurde durch die Prozesssimulation und den Austausch mit Experten im Bereich der Kryotechnik deutlich, dass auch der Gegenstromwärmeübertrager hinter der Vorkühlungsstrecke sowie das Drosselventil durch ein Vakuum isoliert werden müssten und zusätzlich MLI zur Isolierung gegen Wärmestrahlung angebracht werden sollte. Zudem war die Zertifizierung durch eine Prüfgesellschaft in der ursprünglichen Planung nicht vorgesehen.

2. **Beschaffung von Prozesskomponenten:** Während der praktischen Umsetzung des dezentralen Wasserstoffverflüssigers erwies sich die Beschaffung einiger Prozesskomponenten als besondere Herausforderung. Zum einen sind viele Standardkomponenten, die im Umgang mit Wasserstoff eingesetzt werden, für den kleinen Maßstab der Anlage nicht verfügbar. Komponenten der richtigen Größe wiederum waren oft sehr teuer oder nicht für das Medium Wasserstoff zugelassen.
3. **Sicherheitsaspekte:** Da es sich bei dem entwickelten Verflüssiger um einen Prototypen handelt und kaum vergleichbare Modelle existieren, war die Ausarbeitung des Sicherheitskonzepts sehr zeitaufwändig und erforderte zahlreiche iterative Anpassungen des Prozesskonzepts.

Eine vollständige technologische Bewertung der Projektergebnisse kann erst nach der Inbetriebnahme des Prototyps erfolgen. Erst dann wird u.a. feststehen, welche

Wirkungsgrade mit der Anlage erzielt werden können und ein abschließender Vergleich mit anderen Prozesskonzepten kann vorgenommen werden. Folgende Erkenntnisse, die für die technologische Bewertung relevant sind, wurden jedoch bereits gewonnen:

- **Hochdruckniveau:** In Abschnitt 3.1.2 wird die Auslegung des Druckniveaus vor der Drosselung ausführlich beschrieben. Das Ziel der Berechnungen war, einen möglichst großen Anteil des Wasserstoffs durch die isenthalpe Drosselung zu verflüssigen. Erst während der Komponentenbeschaffung wurde deutlich, dass mit dem festgelegten Hochdruckniveau in Bezug auf manche Bauteile eine kritische Grenze überschritten wurde. Beispielsweise konnte kein Anbieter für ein Überdruckentlastungsventil im Hochdruckbereich ermittelt werden. Ventile, die sich für den relativ niedrigen Massenstrom der Anlage eignen, waren nur für Drücke bis 50 bar verfügbar. Die Anlage wird daher eventuell mit einem niedrigeren Hochdruckniveau in Betrieb genommen. Ein niedrigeres Druckniveau geht mit einem niedrigeren Flüssigphasenanteil nach der Drosselung einher und die Verluste durch die offene Prozessführung wären höher (siehe folgender Punkt).
- **Offene Prozessführung:** Durch die isenthalpe Drosselung im Linde-Hampson-Verfahren wird nur ein Teil des Wasserstoffs verflüssigt. Das tiefkalte, nicht verflüssigte Gas wird zurückgeführt und im Gegenstromwärmeübertrager vor der Drosselung zur Vorkühlung genutzt. Danach gibt es zwei Möglichkeiten: entweder das Gas wird in die Umgebung entlassen (offene Prozessführung) oder durch einen Kompressor verdichtet und dem Prozess erneut zugeführt (geschlossene Prozessführung). Laut Projektantrag vom 01.06.2022 sollte zunächst eine offene Prozessführung umgesetzt werden, finanzielle Mittel für einen Kompressor wurden nicht beantragt. Um die Entstehung von zünd- und explosionsfähigen Atmosphären durch austretenden Wasserstoff zu vermeiden, wurde eine Abgasverdünnung mittels Luftgebläse konzipiert. Eine offene Prozessführung ist für die erste Inbetriebnahme auch weiterhin geplant. Die Erweiterung der Anlage um einen Kompressor erscheint jedoch für den regelmäßigen Betrieb sinnvoll, da so die Verluste der Prozessgase drastisch verringert würden. Ökonomisch ist die geschlossene Prozessführung allerdings nur bei einer hochfrequenten Nutzung der Anlage vorteilhaft, wenn die Kosten durch Verbrauch der Prozessgase die Anschaffungskosten eines Kompressors übersteigen. Durch eine geschlossene Prozessführung könnten auch höhere Verluste durch Anpassungen des Hochdruckniveaus kompensiert werden (siehe vorheriger Punkt).
- **Flexibler Transport und Aufbau:** Laut Projektantrag sollte eine mobile Containerlösung erarbeitet werden, wodurch ein örtlich flexibler Aufbau der Anlage möglich wäre. Dadurch bräuchte es keine Zwischenspeicher für LH₂, um die Anwender zu versorgen. Im Planungsverlauf zeigten sich jedoch sicherheitstechnische Hürden für diese örtlich flexible Verflüssigung im Zusammenhang mit der Deklaration von

Ex-Schutzzonen. Ursprünglich sollte die Anlage so konzipiert werden, dass keine Ex-Schutzzonen definiert werden müssten. Voraussetzung wäre aber, dass auch im Fehlerfall keine zünd- und explosionsfähigen Atmosphären zu erwarten wären. Dafür sollte Wasserstoff im Fehlerfall aus Überdruckentlastungsventilen durch Verdünnung mit Luft sicher abgeführt werden, genauso wie das im Regelbetrieb anfallende Abgas. Um dies zu gewährleisten, hätte allerdings ein Gebläse beschafft werden müssen, das auch für diesen Fehlerfall leistungsstark genug ist, ein geeignetes Gebläse wäre jedoch sehr laut gewesen. Regelbare Gebläse hingegen, die nur im Fehlerfall auf die volle Leistung umgestellt werden, sind deutlich teurer. Zudem müsste die Sicherheit der Regelung nach definierten Standards nachgewiesen werden. Aus diesen Gründen wurde für den Prozess eine Ex-Schutzzone (Kategorie 2) über dem Dach der Anlage auf dem Außengelände des Wasserstoff Campus Salzgitter ausgewiesen, in die die vorgesehenen Sicherheitsventile den Wasserstoff im Fehlerfall ablassen. Aufbau und Inbetriebnahme der Anlage an einem anderen Standort sind dadurch erschwert. Eine mögliche Alternative sind mobile Dewargefäße für den Transport zum Anwender, die für LH2 beispielsweise im 250 l Maßstab erhältlich sind.

Das Linde-Hampson-Verfahren wurde unter anderem gewählt, weil es gegenüber den alternativen Verfahren als ökonomisch vorteilhaft eingestuft wurde. Wie bereits dargestellt, lagen die tatsächlichen Kosten für den Verflüssiger jedoch deutlich über den ursprünglichen Schätzungen. Das vorgestellte Prozesskonzept sieht einen Feedmassenstrom von 2 kg gasförmigem Wasserstoff pro Stunde vor. Dieser Massenstrom ließe sich auch in einer geschlossenen Prozessführung realisieren, geeignete Kompressoren wurden bereits identifiziert. Im theoretischen Optimum können davon 18 %, also $0,36 \text{ kg h}^{-1}$ verflüssigt werden (siehe Abschnitt 3.1.2). Schätzt man für den realen Betrieb etwa 30-60 % dieser theoretisch maximalen Verflüssigungsleistung, so liegt der Wert zwischen $0,11\text{-}0,22 \text{ kg h}^{-1}$. Ökonomisch betrachtet könnte ein Prozesskonzept mit einem am Markt verfügbaren Kryokühler (z.B. Gifford-McMahon-, Stirling- oder Pulsrohrkühler) vergleichbar ausfallen. Nach einer Auskunft vom Hersteller Sumitomo kostet ein Gifford-McMahon-Kryokühler mit einer Kälteleistung von 45 W bei 20 K beispielsweise rund 40.000 €. Damit könnten nach einer Vorkühlung mit Stickstoff ca. $0,15 \text{ kg h}^{-1}$ verflüssigt werden. Die Anschaffungskosten des Kryokühlers sind zwar relativ hoch, bei einem Prozesskonzept mit integriertem Kryokühler könnten jedoch an anderer Stelle Kosten eingespart werden: Aufgrund der kompakten Bauweise des Kryokühlers würde die Vakuumkammer zur thermischen Isolierung kleiner ausfallen und das für den Linde-Hampson-Prozess benötigte Expansionsventil entfallen. Eine Hochskalierung der Verflüssigung mittels Kryokühler wäre allerdings nur durch Parallelschaltung mehrerer Kryokühler möglich. Zumindest in der offenen Prozessführung ist die hier vorgestellte Anlage auch für höhere Massenströme geeignet, die Verflüssigungsleistung ist daher skalierbar, ohne dass die Anlage baulich verändert werden muss. Diese Eigenschaft

wurde auch bei der Antragsstellung hervorgehoben. Wie zuvor beschrieben, bietet die geschlossene Prozessführung jedoch erhebliche Vorteile und die Massenströme sind dann durch den Kompressor begrenzt. Eine umfassende Untersuchung und Bewertung des Linde-Hampson-Verflüssigers, auch im Vergleich mit alternativen Prozesskonzepten, wird nach der Inbetriebnahme des Prototyps erfolgen.

Für die Bewertung der Ergebnisse aus ökologischer Perspektive ist festzustellen, dass ein bedeutender Schritt in Richtung der dezentralen LH₂-Versorgung im Raum Braunschweig gemacht wurde. Die Arbeiten am dezentralen Linde-Hampson-Verflüssiger sind weitestgehend abgeschlossen und die Anlage wird nach Projektende aus eigenen Mitteln fertiggestellt. Im Laufe des Jahres 2026 soll eine niedrighschwellige, flexible Versorgung mit LH₂ für Akteure in Forschung und Entwicklung bereitgestellt werden. Wie bereits in der Einleitung erläutert, kann LH₂ zukünftig zu einer funktionierenden Wasserstoffwirtschaft beitragen: einerseits als Speicherform für Transport und Zwischenspeicherung von Wasserstoff, andererseits als Treibstoff im Flugverkehr, Schwerlastverkehr und in der Binnenschifffahrt. Eine funktionierende Wasserstoffwirtschaft ist wiederum ein zentraler Baustein der Energiewende [BMW20].

Neben der entstehenden Infrastruktur ergibt sich die Umweltrelevanz des DEWAS-Projekts durch die zahlreichen neuen Anknüpfungspunkte für Forschungsarbeiten zur LH₂-Thematik an der TU Braunschweig, die aus diesem Projekt hervorgegangen sind. Am Institut für Thermodynamik werden innerhalb eines Promotionsvorhabens im Exzellenzcluster SE2A Konzepte zur Exergierückgewinnung bei der Regasifizierung von LH₂ erforscht. Zahlreiche Publikationen sind daraus bereits hervorgegangen [Len+22; Len+24; LT25].

Seit Februar 2025 arbeitet das Institut für Thermodynamik außerdem im Kooperationsprojekt TREWAS gemeinsam mit der TLK Thermo GmbH an der Entwicklung von Software zur Auslegung von kryogenen Wasserstoffspeichersystemen. Perspektivisch sollen in diesem Zusammenhang Messdaten zur Validierung von Komponentenmodellen mit dem Linde-Hampson-Verflüssiger generiert werden. Darüber hinaus werden im EU-geförderten Projekt „H₂-Infrastruktur am NFF - H₂-iNFFra“ am sogenannten H₂-Terminal in der Nähe des Braunschweiger Forschungsflughafens innovative Infrastrukturen für Wasserstoff- und Brennstoffzellensysteme eingerichtet [H2-25]. Sowohl für gasförmigen als auch für flüssigen Wasserstoff soll die Infrastruktur zur Unterstützung der Wasserstofftechnologie in der Forschung und der praktischen Anwendung ausgebaut werden. Das Institut für Thermodynamik der TU Braunschweig wird hier seine Aktivitäten im Bereich der dezentralen Wasserstoffverflüssigung weiter vertiefen. Teil des H₂-Terminals sind auch ein Multicor-Elektrolyseur der Firma Enapter mit einer Leistungsklasse von 1 MW sowie ein Hochtemperaturelektrolyseur (solide oxide electrolysis cell, SOEC) [TU

23]. Ziel ist u.a. auch die Untersuchung einer Kopplung von dezentraler Wasserstoffherzeugung mit der dezentralen Verflüssigung.

Auch das Projektvorhaben TOWEWA befasst sich mit der flüssigen Speicherform des Wasserstoffs und ihrem Potenzial für die zukünftige Energieversorgung. In TOWEWA sollen Wertschöpfungsketten für LH2 erforscht, thermodynamisch bewertet und optimiert werden. TOWEWA wurde als Verbundprojekt der TU Braunschweig und der Hochschule Ostfalia in der EFRE-Förderschiene beim Niedersächsischen Ministerium für Wissenschaft und Kultur beantragt. Die Projektpartner wurden inzwischen zum Vollantrag aufgefordert und ein Beginn des Projekts wird ab Januar 2026 erwartet. Durch die geplante Kooperation mit der Memorial University in Neufundland, Kanada, entsteht in TOWEWA ein internationales Forschungsnetzwerk, das gerade im Kontext der globalen Energiewirtschaft und der strategischen Energiepartnerschaft mit Kanada von großer Bedeutung ist.

Im Zuge der Arbeiten am Linde-Hampson-Verflüssiger sowie der darauf aufbauenden Projekte konnten zudem Kontakte zu zahlreichen Unternehmen und Interessengruppen ausgebaut und geknüpft werden. Ein Austausch besteht mit den Unternehmen ContiTech, der Airbus-Tochter CTC GmbH, der Kelvion PHE GmbH und dem Firmenverbund Energy Hub Wilhelmshaven, die u.a. das TOWEWA-Projekt als assoziierte Partner unterstützen.

Das Projektvorhaben wurde beim 12. Braunschweiger Energieseminar vom 20.-21. September 2023 durch eine Posterpräsentation vorgestellt. Projektergebnisse sind kontinuierlich in die Lehrveranstaltungen des Instituts für Thermodynamik an der TU Braunschweig eingeflossen. Im November 2024 wurden innerhalb eines Fachvortrags im Format „Deep Dive“ des Wasserstoff Campus Salzgitter die LH2-bezogenen Forschungsaktivitäten der TU Braunschweig und der TLK Thermo GmbH, darunter auch der Aufbau einer dezentralen Versorgung mit LH2, vorgestellt. Zudem wurde das Projekt durch einen Konferenzbeitrag (Vortrag und Veröffentlichung) im Rahmen der Cryogenics 2025 vom 07.-11. April in Prag präsentiert [Tap+].

4 Fazit

Im DEWAS-Projekt konnten wesentliche Ziele auf dem Weg zu einer dezentralen Versorgung mit LH₂ im Raum Braunschweig erreicht werden. Der Prototyp des Linde-Hampson-Verflüssigers konnte jedoch bis zum Projektende nicht vollends fertiggestellt werden. Hauptgründe sind die Finanzierung, da die realen Kosten deutlich über der ursprünglichen Schätzung lagen, sowie die komplexen sicherheitstechnischen Anforderungen und damit verbundene Schwierigkeiten bei der Bauteilbeschaffung.

Ein Großteil der Anlage wurde bereits aufgebaut und für die Fertigstellung stehen inzwischen zusätzliche finanzielle Mittel zur Verfügung. Die Inbetriebnahme des Linde-Hampson-Verflüssigers ist bis Mitte 2026 geplant. Derzeit wird die Anlagensteuerung über LabView implementiert, bevor dann der Prozess mit Stickstoff getestet wird. Anschließend wird die Anlage auf dem Außengelände des Wasserstoff Campus Salzgitter installiert und das Sicherheitskonzept von der TÜV SÜD GmbH überprüft. Nach erfolgreicher Zertifizierung durch die Prüfgesellschaft erfolgt die Inbetriebnahme mit Wasserstoff.

Daraufhin kann das Prozesskonzept umfassend bewertet und untersucht werden. Für Folgeprojekte zur dezentralen Verflüssigung von Wasserstoff wird das hier vorgestellte Konzept dann kritisch mit alternativen Methoden, wie dem Einsatz eines kommerziell erhältlichen Kryokühlers, verglichen.

Literatur

- [Ago23] Agora Industrie und TU Hamburg. *Wasserstoff-Importoptionen für Deutschland: Analyse mit einer Vertiefung zu Synthetischem Erdgas (SNG) bei nahezu geschlossenem Kohlenstoffkreislauf*. Hrsg. von Agora Industrie. 2023.
- [Ale+23] Alexander Alekseev u. a. *Wasserstoff-Verflüssigung, Speicherung, Transport und Anwendung von flüssigem Wasserstoff*. Hrsg. von Bundesministerium für Bildung und Forschung. 2023. DOI: 10.5445/IR/1000155199.
- [Arm] Armin Hain GmbH & Co.KG. "Technisches Datenblatt Hartlot Ag 156 - DIN EN ISO 17672". In: ().
- [Aus19] Ausschuss für Gefahrstoffe. *TRBS 1201: Prüfungen von Arbeitsmitteln und Überwachungsbedürftigen Anlagen*. 23.05.2019.
- [Aus21] Ausschuss für Gefahrstoffe. *TRGS 400: Gefährdungsbeurteilung für Tätigkeiten mit Gefahrstoffen*. 15.11.2021.
- [Bej16] Adrian Bejan. *Advanced Engineering Thermodynamics*. Fourth Edition. Hoboken New Jersey: John Wiley & Sons Inc, 2016. ISBN: 9781119052098.
- [BD22] Bernd Bertsche und Martin Dazer. *Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2022. ISBN: 978-3-662-65023-3. DOI: 10.1007/978-3-662-65024-0.
- [BMW20] BMWi. *Die Nationale Wasserstoffstrategie*. Hrsg. von Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. 2020.
- [Bun15] Bundesministerium für Arbeit und Soziales. *Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Verwendung von Arbeitsmitteln: BetrSichV*. 3.02.2015.
- [Bun24a] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. *Einigung zur Kraftwerksstrategie: Pressemitteilung*. 2024. URL: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2024/02/20240205-einigung-zur-kraftwerksstrategie.html>.
- [Bun24b] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. *Importstrategie für Wasserstoff und Wasserstoffderivate*. Hrsg. von Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. 2024.
- [Cle24] CleanTech Hub | Lufthansa Group. *Hydrogen Aviation Lab Hamburg: Startschuss für das Fliegen mit Wasserstoff*. 24.01.2024. URL: <https://cleantechhub.lufthansagroup.com/de/schwerpunkte/mobilitaet-von-uebermorgen/hydrogen-aviation-lab-hamburg.html>.
- [Cot61] P. Coterill. "The Hydrogen Embrittlement Of Metals". In: *Progress in Materials Science* 9.4 (1961), S. 205–301. DOI: 10.1016/0079-6425(61)90005-6.

- [Dai23] Daimler Truck AG. *Daimler Truck #HydrogenRecordRun: Mercedes-Benz GenH2 Truck knackt 1.000-Kilometer-Marke mit einer Tankfüllung flüssigem Wasserstoff*. 22.12.2023. URL: <https://www.daimlertruck.com/newsroom/pressemitteilung/daimler-truck-hydrogenrecordrun-mercedes-benz-genh2-truck-knackt-1000-kilometer-marke-mit-einer-tankfuellung-fluessigem-wasserstoff-52369346>.
- [dJT22] María de las Nieves Camacho, Daniel Jurburg und Martín Tanco. “Hydrogen fuel cell heavy-duty trucks: Review of main research topics”. In: *International Journal of Hydrogen Energy* 47.68 (2022), S. 29505–29525. ISSN: 03603199. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.06.271.
- [Eki06] Jack Ekin. *Experimental Techniques for Low-Temperature Measurements: Cryostat Design, Material Properties and Superconductor Critical-Current Testing*. Oxford: Oxford University Press, 2006. ISBN: 9780191717710.
- [Ess07] Jürgen Essler. “Physikalische und technische Aspekte der Ortho-Para-Umwandlung von Wasserstoff”. Dissertation. Dresden: Technische Universität Dresden, 7.09.2007.
- [Eur14] Europäisches Parlament/ Rat. *Richtlinie 2014/68/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 15. Mai 2014 zur Harmonisierung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über die Bereitstellung von Druckgeräten auf dem Markt* Text von Bedeutung für den EWR. 27.06.2014.
- [FJ18] J. E. Fesmire und W. L. Johnson. “Cylindrical cryogenic calorimeter testing of six types of multilayer insulation systems”. In: *Cryogenics* 89 (2018), S. 58–75. DOI: 10.1016/j.cryogenics.2017.11.004.
- [FT65] A Fradkov und F Troitskii. “Liquefier with Two-Stage Conversion to Obtain 98 Percent Para Hydrogen”. In: *Cryogenics* (1965).
- [Gar+15] Nathaniel Maurice Garceau u. a. “Development of a small-scale hydrogen liquefaction system”. In: *International Journal of Hydrogen Energy* 40.35 (2015), S. 11872–11878. ISSN: 03603199. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2015.06.135.
- [Gua+23] Daqin Guan u. a. “Hydrogen society: from present to future”. In: *Energy & Environmental Science* 16.11 (2023), S. 4926–4943. ISSN: 1754-5692. DOI: 10.1039/D3EE02695G.
- [H2-25] H2-iNFra. *H2-Infrastructure at the NFF: Research Project*. 2025.
- [H2F23] H2FLY. *H2FLY And Partners Complete World's First Piloted Flight of Liquid Hydrogen Powered Electric Aircraft*. 2023. URL: <https://www.h2fly.de/2023/09/07/h2fly-and-partners-complete-worlds-first-piloted-flight-of-liquid-hydrogen-powered-electric-aircraft/>.

- [HK07] C. Haberstroh und D. Kirsten. “Personal liquefier” for hydrogen. TU Dresden develops compact liquefier”. In: *HZwei* 7 (2007), S. 10–11.
- [HPL72] C. Y. Ho, R. W. Powell und P. E. Liley. “Thermal Conductivity of the Elements”. In: *Journal of Physical and Chemical Reference Data* 1.2 (1972), S. 279–421. ISSN: 0047-2689. DOI: 10.1063/1.3253100.
- [Hoe+22] J. Hoelzen u. a. “Hydrogen-powered aviation and its reliance on green hydrogen infrastructure – Review and research gaps”. In: *International Journal of Hydrogen Energy* 47.5 (2022), S. 3108–3130. ISSN: 03603199. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.10.239.
- [Höl24] Julian Hölzen. “Hydrogen-Powered Aviation: Techno-Economics of Flying with Green Liquid Hydrogen”. Dissertation. Hannover: Gottfried Wilhelm Leibniz Universität, 2024.
- [Hub+18] Marcia Huber u. a. *NIST Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties Database (REFPROP) Version 10 - SRD 23*. 2018. DOI: 10.18434/T4/1502528.
- [HyN23] HyNEAT. *Hydrogen Supply Networks’ Evolution for Air Transport*. 7.02.2023. URL: <https://www.hyneat.de/>.
- [Inc+23] Jimena Incer-Valverde u. a. “Colors” of hydrogen: Definitions and carbon intensity”. In: *Energy Conversion and Management* 291 (2023), S. 117294. ISSN: 01968904. DOI: 10.1016/j.enconman.2023.117294.
- [Int] International Organization for Standardization. *Vacuum Technology, Vocabulary: Part 1: General Terms*. Genf.
- [IRE22] IRENA. *Global hydrogen trade to meet the 1.5 °C climate goal: Part I - Trade outlook for 2050 and way forward*. Hrsg. von International Renewable Energy Agency. 2022.
- [KME21] KME Germany GmbH. “KME Cu-DHP: Phosphorus-Deoxidized Copper, High Residual Phosphorus”. In: *Alloy Digest* 70.8 (2021). ISSN: 0002-614X. DOI: 10.31399/asm.ad.cu0923.
- [KSN10] Songwut Krasae-in, Jacob H. Stang und Petter Neksa. “Development of large-scale hydrogen liquefaction processes from 1898 to 2009”. In: *International Journal of Hydrogen Energy* 35.10 (2010), S. 4524–4533. ISSN: 03603199. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2010.02.109.
- [Lea+09] J. W. Leachman u. a. “Fundamental Equations of State for Parahydrogen, Normal Hydrogen, and Orthohydrogen”. In: *Journal of Physical and Chemical Reference Data* 38.3 (2009), S. 721–748. ISSN: 0047-2689. DOI: 10.1063/1.3160306.

- [Len+24] M. Lenger u. a. “On the importance of liquid hydrogen exergy utilisation for an energetically efficient hydrogen energy economy”. In: *International Journal of Hydrogen Energy* 89 (2024), S. 612–617. ISSN: 03603199. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.09.191.
- [LT25] Magnus Lenger und Wilhelm Tegethoff. “Liquid hydrogen regasification with exergy utilisation: Processes and process operation for maximal power generation”. In: *International Journal of Hydrogen Energy* 140 (2025), S. 84–100. ISSN: 03603199. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2025.05.065.
- [Len+22] Magnus Lenger u. a. “Synergies of fuel cell system thermal management and cryogenic hydrogen exergy utilization”. In: *Scientific reports* 12.1 (2022), S. 22065. DOI: 10.1038/s41598-022-26561-9.
- [Nak+10] Akihiro Nakano u. a. “Small-scale hydrogen liquefaction with a two-stage Gifford–McMahon cycle refrigerator”. In: *International Journal of Hydrogen Energy* 35.17 (2010), S. 9088–9094. ISSN: 03603199. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2010.05.104.
- [PvG] Maximilian Pfennig, Michael von Bonin und Norman Gerhardt. *PTX-ATLAS: Weltweite Potentiale für die Erzeugung von grünem Wasserstoff und klimaneutralen synthetischen Kraft- und Brennstoffen: Teilbericht im Rahmen des Projekts DeV-KopSys*.
- [Pom+24] Evangelos E. Pompodakis u. a. “Hydrogen Production from Wave Power Farms to Refuel Hydrogen-Powered Ships in the Mediterranean Sea”. In: *Hydrogen* 5.3 (2024), S. 494–518. DOI: 10.3390/hydrogen5030028.
- [Sch+23] P. Schühle u. a. “Dimethyl ether/CO₂ – a hitherto underestimated H₂ storage cycle”. In: *Energy & Environmental Science* 16.7 (2023), S. 3002–3013. ISSN: 1754-5692. DOI: 10.1039/D3EE00228D.
- [Shi+23] Behrang Shirzadeh u. a. “Towards a resilient and cost-competitive clean hydrogen economy: the future is green”. In: *Energy & Environmental Science* 16.12 (2023), S. 6094–6109. ISSN: 1754-5692. DOI: 10.1039/D3EE02283H.
- [Sta+22] Frithjof Staiß u. a. *Optionen für den Import grünen Wasserstoffs nach Deutschland bis zum Jahr 2030: Transportwege - Länderbewertungen - Realisierungserfordernisse: (Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft)*. Hrsg. von acatech - Deutsche Akademie der Wissenschaften e.V. München, 2022. DOI: 10.48669/ESYS{\textunderscore}2022-6.
- [Tap+] Aike Tappe u. a. “Design and Technical Implementation of a Small-Scale Hydrogen Liquefier based on the Pre-Cooled Linde-Hampson Cycle”. In: *The 18th Cryogenics 2025 IIR International Conference*. Bd. 18, S. 141–146.

- [TLK24] TLK-Thermo GmbH. *TIL Suite: Modeling and Simulation of Thermal Systems*. 1.03.2024. URL: <https://www.tlk-thermo.com/en/software/til-suite>.
- [TU 23] TU Braunschweig | Blogs. *Spatenstich zum Neubau des Hydrogen-Terminals am Braunschweiger Forschungsflughafen*. 24.03.2023. URL: <https://magazin.tu-braunschweig.de/pi-post/spatenstich-zum-neubau-des-hydrogen-terminals-am-braunschweiger-forschungsflughafen/>.
- [Umb] Umberto Federico Cardella. "Large-scale hydrogen liquefaction". Diss.
- [VV02] Verein Deutscher Ingenieure und VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, Hrsg. *VDI-Wärmeatlas: Berechnungsblätter für den Wärmeübergang*. 9. Aufl. 2002. ISBN: 978-3-662-10744-7.
- [VÅN18] Valentin Vogl, Max Åhman und Lars J. Nilsson. "Assessment of hydrogen direct reduction for fossil-free steelmaking". In: *Journal of Cleaner Production* 203 (2018), S. 736–745. ISSN: 09596526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.08.279.
- [Yan+21] Fuyuan Yang u. a. "Review on hydrogen safety issues: Incident statistics, hydrogen diffusion, and detonation process". In: *International Journal of Hydrogen Energy* 46.61 (2021), S. 31467–31488. ISSN: 03603199. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.07.005.
- [Zab64] Michael Zabetakis. *Flammability Characteristics of Combustible Gases and Vapours*. Washington: U.S. Department of the Interior, 1964.
- [Zer24] ZeroAvia. *Hydrogen Fuel for Zero Emission Flight*. 18.12.2024. URL: <https://zeroavia.com/hare/>.

A Anhang

- A1, Seite 43 - 45: Technische Zeichnungen der Vakuumkammer
- A2, Seite 46: Technische Zeichnung des LH2-Speichers

