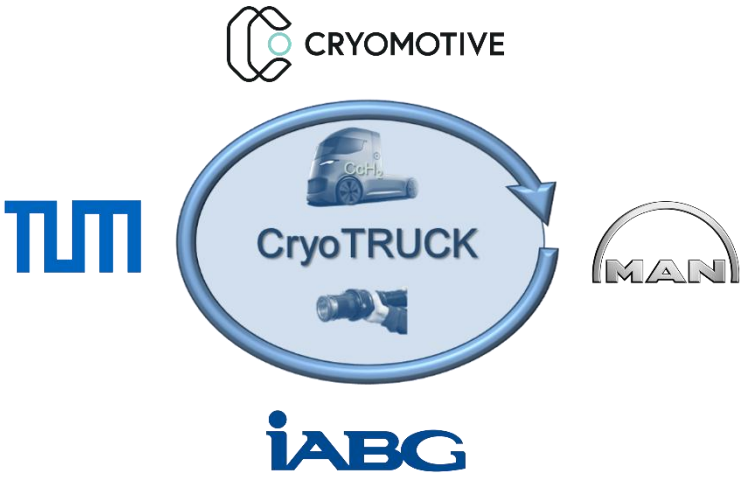
Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie Phase 2 (NIP II)

Abschlussbericht

Teil 2 - Vorhabenergebnisse

Vorhabentitel „CryoTRUCK“

Projektpartner: Cryomotive GmbH (CMO)



Gefördert durch:
Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur

Koordiniert durch:
NOW GMBH.DE

Projektträger:
Projektträger Jülich Forschungszentrum Jülich

Inhalt

Inhalt 2
1. Darstellung der erzielten Vorhabenergebnisse 3
1.1. Struktur und Historie des Verbundvorhabens CryoTRUCK 3
1.2. Zielstellung // Zielerreichung 3
1.3. Verwertung der Ergebnisse und Ziele 4
1.4. Veröffentlichungen 5
1.5. Arbeiten Dritter 5
2. Darstellung der erzielten Arbeitsergebnisse 6
2.1. Arbeitspaket 0- Projektmanagement 9
2.2. Arbeitspaket 1- Package und Systemgestaltung 10
2.3. Arbeitspaket 2- Spezifikation und Anforderungen 12
2.4. Arbeitspaket 3- Komponentenentwicklung 12
2.5. Arbeitspaket 4- Systementwicklung 26
2.6. Arbeitspaket 5- Absicherung 34
2.7. Arbeitspaket 6- Fahrzeugintegration in MAN Lkw Versuchsträger 46
2.8. Arbeitspaket 8- Lkw Versuchsträger Erprobung MAN 47

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr unter dem Förderkennzeichen 03B10411A gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Version	Datum	Änderungen / Anpassungen
1.0	12.12.2025	Erstausgabe
2.0	13.03.2026	Einarbeitung Rückmeldung PTJ

1. Darstellung der erzielten Vorhabenergebnisse

Der vorliegende Bericht beinhaltet die erzielten Vorhabenergebnisse des Fördervorhabens „CryoTRUCK“ des Zuwendungsempfängers Cryomotive GmbH. Das Projekt wurde im Zeitraum vom 01.01.2022 bis zum 30.05.2025, zusammen mit 3 weiteren Partnern, durchgeführt.

1.1. Struktur und Historie des Verbundvorhabens CryoTRUCK

Das Projekt „CryoTruck“ (FKZ: 03B10411A) wurde anfänglich durch 5 Partner (Cryomotive, MAN, Clean Logistics, IABG, TU München) als Einzelvorhaben im Rahmen der Förderrichtlinie NIP II beantragt und mit Förderbeginn zum 01.01.2022 genehmigt. Für dieses Projekt wurde die Cryomotive GmbH als Verbundführer benannt. Aufgrund des frühen Ausscheidens von Clean Logistics im Laufe des Jahres 2022 reduzierte sich die Zahl der Partner auf insgesamt 4.

Das Förderprojekt „CryoTRUCK“ wurde mit einem Umfang von 10 Arbeitspaketen beantragt, die sich durch das Ausscheiden des Projektpartners Clean Logistics veränderten. Dadurch entfielen die Arbeitspakete 7 und 9, welche die Arbeitsanteile von CL beschrieben. Trotz des Ausscheidens konnte das Projekt, in Abstimmung mit dem Fördergeber PTJ, fortgeführt werden, da die beantragten Ziele im überwiegenden Maße erreicht werden konnten. Einzig die Realisierung auf einer zweiten Fahrzeugplattform, neben dem MAN Fahrzeug, entfiel. Durch das Ausscheiden reduzierte sich der ursprüngliche Umfang der Arbeitspakete, sowie der relevanten Meilensteine.

1.2. Zielstellung // Zielerreichung

Gemäß der dem Förderbescheid zugrundeliegenden Teilvorhabenbeschreibung (TVB) waren folgende Ziele zu erreichen:

- Entwicklung eines CcH2 Tanksystem Versuchsträgers bestehend aus zwei am Lkw Trägerrahmen links und rechts befestigten Behältern, inklusive aller relevanten Komponenten bis zur Erprobungsreife für zwei Nutzfahrzeug-Versuchsträger, einem neu entwickelten Lkw (MAN) und einem umgerüsteten Lkw (CL); zur Sicherstellung der für den Technologienachweis notwendigen technologischen Reife (TRL7) ist ein ausreichendes experimentelles Absicherungsprogramm zum Beleg der Erfüllbarkeit der Performance-Anforderungen (Massenströme, Druckbereitstellung, Temperaturbeständigkeit, Kühlfunktion), Sicherheitsanforderungen (Brandsicherheit, Intrusionssicherheit, Versagenssicherheit) und Lebensdaueranforderungen (mindestens 5 Jahre Lebensdauer und äquivalenter Zyklenfestigkeit) zu entwickeln und durchzuführen.
- Entwicklung von Auslegungstools (1D Thermodynamik, 2D und 3D thermisch und CFD) und Entwicklungsrichtlinien (Materialvorgaben, Fertigungsprozesse, Betankungsprozess)
- Entwicklung von Fertigungstechnologien für die zentralen Komponenten der CcH2 Speichertechnologie (Liner, CFK-Armierung, MLI-Isolation, Schweißtechnik, Kaltventil, Innentank-Wärmetauscher, Kühlwasserwärmetauscher, Alu-Stahl Materialübergänge, Verrohrung, katalytisches Abblasesystem (Blow-off Managementsystem, BMS)), sowie der dazugehörigen Fertigungs- und Montageverfahren zur Sicherstellung der Wertschöpfung in Deutschland bei der CMO
- Nachweis der Betankbarkeit durch ein erstes CcH2 Betankungssystem mittels einer neu entwickelten Betankungskupplung mit Schlauch und Abrisskupplung, sowie durch Bereitstellung

einer (außerhalb des Projekts) entwickelten mobilen Tankstelle für die Erprobung der Lkw Versuchsträger auf dem Versuchsgelände der MAN (für MAN und ggf. CL)
- Vorbereitung eines Betankungsstandards für die Einbringung in die ISO Standardisierung ab 2022

Die genannten Ziele wurden aus dem innovativen Charakter des Technologieansatzes abgeleitet. Dazu sind die hohe Speicherkapazität, die ausreichende Druckbereitstellung, die Mehrtankfähigkeit, die langen verlustfreuen Standzeiten, sowie die vereinfachte Isolation und Kapazitätsbestimmung besonders hervorzuheben.

Die im Vorhaben **erreichten Ziele** sind im Folgenden zusammengefasst und im Detail und pro Arbeitspaket im Kapitel 4 dargestellt.

- Es wurde ein CcH2 Tanksystem Versuchsträger entwickelt und die Integration auf die MAN LKW-Plattform wurde virtuell gezeigt.
- Nach einem Mock-up wurde ein 1-Tank Speichersystem erfolgreich aufgebaut und initial erprobt. Damit konnte TRL 6 (Betrieb unter Laborbedingungen) gezeigt werden.
- Entwicklung eines Drucktanks (Typ 3), der die Anforderungen an Lebensdauer und Zyklenfestigkeit erfüllt.
- Erfüllen der wesentlichen Performance- und Sicherheitsanforderungen.
- Auslegungstools und Entwicklungsrichtlinien wurden entwickelt.
- Fertigungs- und Montageverfahren für das Gesamtsystem, sowie für Bauteile, wurden entwickelt und erprobt.
- Betankungsversuche mittels einer neu-entwickelten CcH2-Betankungskupplung wurden erfolgreich durchgeführt.
- Die Entwicklung eines ISO-Betankungsstandards wurde innerhalb des Projektes im Jahr 2023 begonnen.

Folgende Ziele konnten im Vorhaben **nicht** erreicht werden:

- Physischer Einbau eines Speichersystems in den MAN-Erprobungsträger
- Validierung mit CcH2 mit Status TRL 7
- Aufbau und Erprobung eines 2-Tank Speichersystems.

1.3. Verwertung der Ergebnisse und Ziele

Die erlangten Ergebnisse bilden die Grundlage für weiterführende Aktivitäten zur Reifmachung der CcH2-Speichertechnologie. Dabei ist besonders die Unterstützung der Standardisierungsaktivitäten zu nennen, welche im Kapitel 2.1 detaillierter dargestellt werden.

Weiterhin konnten Ergebnisse in andere Forschungsvorhaben überführt werden, bzw. wechselseitig genutzt werden. Das Projekt „ColdHyFuel“ (FKZ: 03B11036C) diente dem Austausch von Ergebnissen aus der Entwicklung von nicht fahrzeugseitiger Betankungshardware.

Konkret wurde die im Projekt CryoTRUCK entwickelte Betankungsschnittstelle (AP 3.x) in eine vereinfachte Tankstelle (Dispenser) integriert und im Zusammenspiel mit einer Medienversorgung (Stickstoff und Wasserstoff) erste Betankungsversuche durchgeführt werden. Die im AP 5.9 dargestellten

Validierungsversuche nutzen die im Förderprojekt ColdHyFuel erstellten Anlagen. Umgekehrt fungierte das Tanksystem als Abnehmer der Medien, so dass im Zusammenspiel der Anlagen aus ColdHyFuel und CryoTRUCK komplette Betankungsvorgänge erprobt werden konnten.

Weiterhin konnten Erkenntnisse aus dem vorliegenden Vorhaben in die EU-geförderten Projekte „DISCO2030“ und „TRIATHLON“ fließen.

Das Projekt DISCO2030 untersucht die Fertigung von Bauteilen mit Hilfe von additiven Fertigungsverfahren bei „dissimilar materials“. In dem durch Cryomotive verantworteten Use-Case werden Druckbehälter gefertigt und validiert. Dazu wurden Druckbehältergeometrie, vereinzelte Bauteilkonstruktionen und Validierungsstrategien aus dem Projekt CryoTRUCK bereitgestellt.

Das Projekt TRIATHLON nutzt vereinfachte Regelstrategien und Ergebnisse der Tanksimulation, um eine mehrstufige Speichertechnologie für die Luftfahrt zu entwickeln.

Weitere Details zur Verwertung sind dem Erfolgskontrollbericht zu entnehmen.

1.4. Veröffentlichungen

Folgende Publikationen sind während des Projektes unter Beteiligung von Cryomotive (zusammen mit anderen Partnern) entstanden:

- Hamacher, J., Stary, A., Stops, L., Siebe, D., **Kapp, M**., Rehfeldt, S., & Klein, H. (2023). Modeling the Thermodynamic Behavior of Cryo-Compressed Hydrogen Tanks for Trucks. Cryogenics, 103743

- Kuhn, M; **Duschek, D**: Welche Rolle spielt Wasserstoff für eine CO2-neutrale Mobilität?“. Energy4Mobility ExpertTalk, München 2023

Weiterhin konnten folgende Konferenzbeiträge präsentiert und veröffentlicht werden:

- Stary, A., **Al-Zoubi, A**., Hamacher, J., Siebe, D., Stops, L., Rehfeldt, S., Klein, H. (2024) *Freie Konvektion an einem horizontalen Zylinder in einem kryo-komprimierten Wasserstofftank*. Jahrestreffen 2024 der DECHEMA-Fachgruppen Wärme- und Stoffübertragung (WSUE) und Trocknungstechnik (TRO)

- Hamacher, J., **Al-Zoubi, A**., Stary, A., Stops, L., Siebe, D., Rehfeldt, S., Klein, H. (2024) *Wärmeübergangskoeffizienten bei der Anwärmung von kryogenem Wasserstoff.* Jahrestreffen 2024 der DECHEMA-Fachgruppen Wärme- und Stoffübertragung (WSUE) und Trocknungstechnik (TRO)

1.5. Arbeiten Dritter

Innerhalb der EU sind der Cryomotive keine weiteren F&E Aktivitäten bekannt, welche die Entwicklung eines CRYOGAS-Speichersystems zum Ergebnis haben. Einzig in den USA ist mit Verne Inc. ein Unternehmen bekannt, welches ein vergleichbares System für den Schwerlastverkehr entwickelt und dies im Projektzeitraum zu einem Prototyp entwickelt hat. Details zu den Arbeiten, insbesondere im

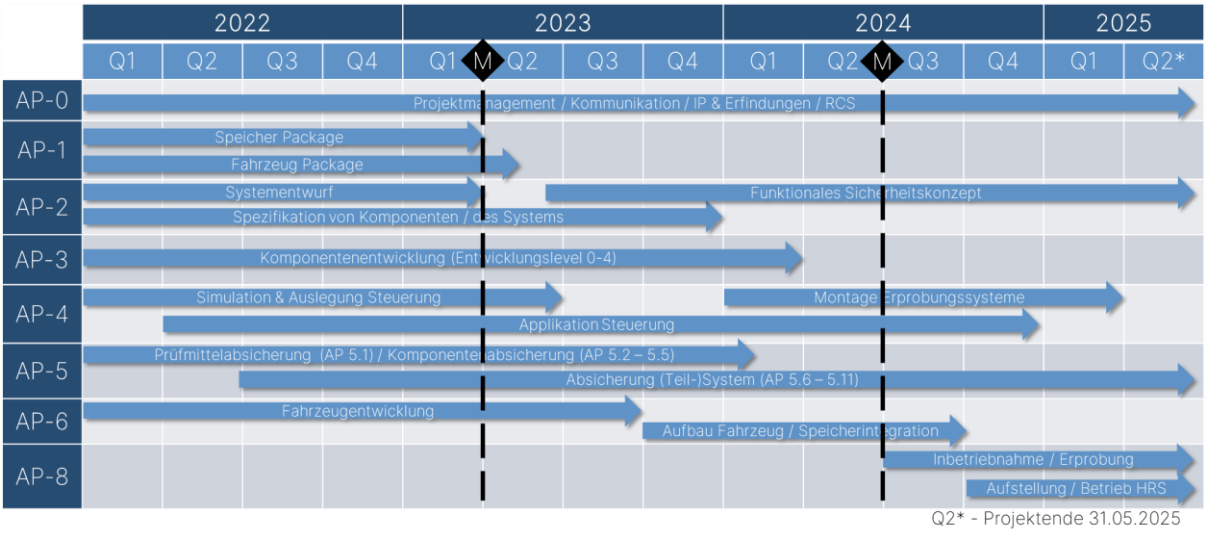
Bereich der Intellectual Property (IP) sind dem entsprechenden Kapitel oder dem Erfolgskontrollbericht zu entnehmen.

2. Darstellung der erzielten Arbeitsergebnisse

Die nach dem Ausscheiden von CL verbliebenen Arbeitspakete waren wie folgt benannt und gegliedert:

AP	Titel	Verantwortlicher Partner
0	Projektmanagement	CMO
1	Package und Systemgestaltung	CMO
2	Spezifikation und Anforderungen	CMO
3	Komponentenentwicklung	CMO
4	Systementwicklung	CMO
5	Absicherung	CMO
6	Fahrzeugintegration in MAN LKW Versuchsträger	MAN
8	LKW Versuchsträger Erprobung MAN	MAN

Das Förderprojekt wurde mit folgender Arbeitspaket- und Meilensteinplanung gestartet:



Q2* - Projektende 31.05.2025

Im Projekt wurden 2 Meilensteine eingeführt und im Laufe der Projektabwicklung leicht angepasst. Diese Anpassungen wurden aufgrund von inhaltlichen Verzögerungen, insbesondere in der Bereitstellung von Testinfrastruktur verursacht.

Die dem Förderbescheid zugrundeliegende Version der Teilvorhabenbeschreibung beinhaltet folgende Beschreibung der Meilensteine:

Meilenstein #1: - Cryomotive (März 2023 / nach 15 Monaten)

Meilenstein 1 bezieht sich auf den Funktionsnachweis der zentralen Komponenten des CcH2 CRYOGAS Speichersystems auf dem Prüfstand. Gemeint sind insbesondere die Komponenten

- *Kryogener Wasserstoff Drucktank (Level 1)*
- *Kryogener Druckbehälter mit Innentankwärmetauscher (ITW), Boss und Materialübergängen (Level 2)*
- *Kaltventil*
- *Kühlwasserwärmetauscher*
- *Druckregelventil*
- *Betankungssystem bestehend aus Receptacle, Kupplung, Schlauch und Abreißkupplung*

Zum Meilenstein 1 sollen diese Komponenten ihre Grundfunktion auf dem Prüfstand bewiesen haben.

- *Zudem soll mit dem Meilenstein 1 die Entwicklung eines Fahrzeug-Integrationskonzepts abgeschlossen sein. Zum Meilenstein 1 sollen von CMO folgende Ergebnisse erzielt worden sein:*
- *Es liegen seitens CMO funktionsfähige Versuchsträger der oben genannten Komponenten vor, die Prüfstandsreife erreicht haben, Dichtheits- und Drucktests bereits durchlaufen haben*
- *CMO hat alle notwendigen Package- und CAD Konstruktionsdaten an MAN und CL bereits gestellt, die für eine Packagefreeze erforderlich sind*
- *CMO hat alle notwendigen Systemspezifikationen und Sicherheitsanforderungen an MAN und CL weiteregegeben, so dass ein Designfreeze der Lkw-Antriebe und Fahrzeuge möglich ist*

Meilenstein #1 wurde in Abstimmung mit dem Fördergeber und unter Berücksichtigung des Projektstandes angepasst und folgende Formulierung wurde dazu vereinbart:

Meilenstein 1 zeigt die erfolgreiche Durchführung folgender Tests und den Abschluss folgender Entwicklungstätigkeiten:

- *Erfolgreiche Durchführung eines Berstversuches*
- *Erfolgreiche Durchführung eines Zyklierversuches*
- *Definition des Systemaufbaus (2-Tanksystem), inklusive aller Funktionen, wie Betrieb, Inbetriebnahme, Spülen.*
- *Bereitstellung sämtlicher Systemspezifikationen.*

Dieser, im Projektverlauf angepasste, Meilenstein konnte planmäßig mit dem 30.03.2023 gezeigt und erreicht werden.

Meilenstein #2 - Cryomotive (Ende Q2/2024 / nach 30 Monaten)

Zum Meilenstein 2 soll ein funktionsfähiges und grundabgesichertes CcH2 Speichersystem in einen ersten Lkw Versuchsträger verbaut sein und die Steuerung bereit sein für die Applikation. Mit dem Meilenstein 2 soll die Basis für den Start der Funktionserprobung im Lkw gelegt sein.

Zum Meilenstein 2 sollen seitens CMO folgende Ergebnisse erzielt worden sein:

- *Ein funktionstüchtiges CcH2 CYROGAS Speichersystem steht bereit und ist in einem ersten Lkw Versuchsträger verbaut*

- *das erste CcH2 CYROGAS Speichersystem hat auf dem Prüfstand die Grundfunktionen anforderungsgerecht nacweisen können*
- *das Versuchssteuergerät für das CcH2 CYROGAS Speichersystem steht bereit zum Verbau in den ersten Lkw Versuchsträger*
- *die Steuerungssoftware für das CcH2 CYROGAS Speichersystem ist virtuell abgesichert und steht bereit zur Applikation auf das Versuchssteuergerät*

Im Projektverlauf und als Ergebnis der regelmäßigen Abstimmung mit dem Fördergeber und den Partnern wurde der Meilenstein in der folgenden Formulierung vorgeschlagen und durch den Fördergeber genehmigt.

Zum Meilenstein 2 soll ein funktionsfähiges und in den wesentlichen Funktionalitäten abgesichertes CcH2-Speichersystem in einem Prüfstand verbaut sein und erste Grundfunktionalitäten (Betankung, Erreichen Betriebsdruck, geregelte Abgabe eines Massenstroms) gezeigt haben. Seitens CMO werden folgende Ergebnisse erreicht:

- *Erfolgreiche Installation und Inbetriebnahme eines 1-Tanksystems*
- *Nachweis der wesentlichen Grundfunktionalitäten zum Nachweis der technologischen Machbarkeit.*
- *Abschluss der vorbereitenden Maßnahmen zur Integration eines 1-Tanksystems auf einem LKW-Erprobungsträger*

Meilenstein #2 wurde, aufgrund der verzögerten Bereitstellung der Versuchsinfrastruktur und einiger Verzögerungen in der Realisierung eines ersten Prototypen zum Ende Q3/2024 erreicht.

Das Förderprojekt „CryoTRUCK“ wurde planmäßig beendet, ohne ein Tanksystem in einem Versuchsträger zu verbauen. Dazu konnten die dafür notwendigen, experimentellen Nachweise auf einem speziell zu errichtenden Prüfstand nicht gezeigt werden. Vor diesem Hintergrund wurde die zwischenzeitlich diskutierte Projektverlängerung nicht umgesetzt.

Weitere Details zur Zielerreichung sind bereits im Kapitel 1.3 benannt.

Die Details zu den Ergebnissen in den einzelnen Arbeitspaketen sind im folgenden Kapitel dargestellt.

2.1. Arbeitspaket 0- Projektmanagement

AP0.1 Projektmanagement

Sämtliche Arbeiten zur Projektkoordination, der Projektsteuerung, sowie des Controllings, inklusive der Abstimmungen mit den Projektpartnern und dem Fördergeber, wurden innerhalb dieses Arbeitspaketes abgewickelt. Dabei sei angemerkt, dass die Cryomotive GmbH in diesem Vorhaben als Verbundführer fungiert hat.

Im Projekt wurden insgesamt 4 Partnertreffen veranstaltet, welche wechselweise bei Cryomotive oder MAN stattgefunden haben.

AP0.2 Kommunikation

Die Bekanntgabe des Fördervorhabens „CryoTRUCK“ wurde, in Abstimmung mit allen Partnern, mit einer Pressemitteilung kommuniziert. Dies geschah ebenso zur Übergabe des Bescheides im Dezember 2022. Diese Pressemitteilungen wurden durch Veröffentlichungen auf Social-Media Kanälen, z.Bsp: LinkedIn begleitet.

Allgemeine Informationen zum Fördervorhaben fanden Eingang in die Cryomotive Firmenpräsentation, welche bei unterschiedlichsten Veranstaltungen gezeigt wurde. In diesem Zusammenhang sei eine Nennung innerhalb einer Präsentation auf der eMove360 im Jahr 2022, der Hannover Messe 2024, sowie einem „Schaufensterworkshop“ (organisiert durch HZwo e.V.) im Jahr 2025 besonders hervorgehoben.

AP0.3 Intellectual Property

Im Einklang mit der IP-Strategie der Cryomotive und der TVB wurden im Rahmen des Projekts CryoTRUCK neben den von der BMW AG übernommenen Schutzrechten zur rechtlichen Absicherung der Entwicklungsarbeiten acht weitere Patentanmeldungen eingereicht. Ziele der IP-Strategie waren die Sicherstellung der Freiheit des zu entwickelnden CRYOGAS-Tanks von Schutzrechten Dritter (Freedom-to-Operate), sowie das Erreichen einer marktbeherrschenden Position oder zumindest die Absicherung relevanter USPs durch das Anmelden eigener Schutzrechte.

Hauptfokus waren hierbei effiziente Betriebsverfahren für CRYOGAS-Tanks sowie konstruktive Details.

Insbesondere im Bereich der Betriebsverfahren für CRYOGAS-Tanks auf LKW sollte das Portfolio der Cryomotive – eine Erteilung der noch anhängigen Anmeldungen vorausgesetzt – eine beträchtliche Sperrwirkung im europäischen Markt entfalten.

Insgesamt wurden im Zuge der Drittpatentüberwachung knapp 1.800 Patentfamilien gesichtet, klassifiziert und verschlagwortet und so für eine abschließende „Freedom-to-Operate“ (FTO) Analyse vorbereitet.

AP0.4 Regulations, Codes and Standards (RCS)

Um den prognostizierten Markthochlauf der CcH2 / CRYOGAS-Speichertechnologe bestmöglich zu unterstützen wurde die Standardisierung der CcH2-Betankung innerhalb des Forschungsvorhabens initiiert. Dazu wurde bei der ISO im Jahr 2023 und 2024 jeweils ein sogenanntes „New-Work-Item-Proposal“ eingereicht und genehmigt, als Grundvoraussetzung zur Etablierung einer neuen Arbeitsgruppe. Daraus entstand die Arbeitsgruppe 36 „Gaseous hydrogen land vehicle refuelling connection devices – Cryo-compressed H2 gas“ im technischen Komitee der ISO. Arbeitsinhalt dieser Gruppe ist die

Standardisierung der Betankungsschnittstelle, sowie des Betankungsprotokolls. Diese Arbeitsgruppe wurde im gesamten Projektzeitraum von Cryomotive geführt und wird die Standardisierung im Jahr 2028, mit der Veröffentlichung eines ISO-Standards, abschließen können.

Neben den wichtigen Arbeiten in der ISO-Organisation wurde die CcH2-Technologie in verschiedenen, weiteren Gremien vertreten. Dazu ist die Arbeit in der „Clean-Energy-Partnership“ (www.cep.expert) zu benennen, wie auch die erfolgreiche Aufnahme von CcH2 als eigene Kraftstoffart in den technischen Regeln für Betriebssicherheit (TRBS) für die sicherheitstechnische Auslegung von Wasserstoff-Tankstellen.

Die zulassungskonforme Auslegung des Speichersystems, sowie die damit verbundenen Aktivitäten zu Zertifizierungsstellen (vornehmlich TÜV Süd) wurden ebenfalls innerhalb dieses Arbeitspaketes verantwortet.

2.2. Arbeitspaket 1- Package und Systemgestaltung

AP1 hat die Konstruktion und Erstellung von 3D Modellen für sämtliche Einzelkomponenten, Teilsysteme und der Gesamtsysteme zum Schwerpunkt. Daneben sind Untersuchungen iterativer Art durchgeführt worden, mit dem Ziel ein den Randbedingungen genügendes Bauraummodell für einen Einbau in verschiedene LKW-Plattformen zu definieren.

AP1.1 Speicherpackage

Die Arbeiten in diesem Arbeitspaket umfassten sämtliche Aufwände zur Entwicklung eines Packagekonzeptes (Positionierung aller Bauteile) für das CcH2-Speichersystem. Dabei mussten verschiedene Faktoren, wie der Einbau von vorgegebenen, marktverfügbaren Bauteilen, konstruktive Randbedingungen und Bauraumeinschränkungen berücksichtigt werden. Ergänzend dazu wurden geometrische Parameter im Wechselspiel mit der Systemsimulation ausgetauscht und optimiert.

AP1.2 Fahrzeugpackage

In diesem Arbeitspaket wurden in Abstimmung mit den Partnern Clean-Logistics (bis zum Ausscheiden zum Jahresende 2022) und MAN verschiedene Konfigurationen des Speichersystems für den Einbau in unterschiedliche LKW-Plattformen betrachtet. Während MAN eine 4x2 Fahrzeugplattform (Sattelzugmaschine) betrachtet, wurde mit CleanLogistics eine anfängliche Betrachtung eines Wechselbrücken-LKW (6x2) durchgeführt. Dadurch konnte der maximale Bauraum für beide Plattformen definiert werden. Nach dem Ausscheiden von CL wurde die Integration in die MAN-Plattform als einzige Lösung weiterverfolgt. Dafür wurde die virtuelle Integration aller Systeme gezeigt und das Montagekonzept unter den vorgegebenen Randbedingungen erarbeitet und mit MAN abgestimmt. Diese umfasste die Integration eines 1-Tank Speichersystems, sowie für ein 2-Tank Speichersystem.

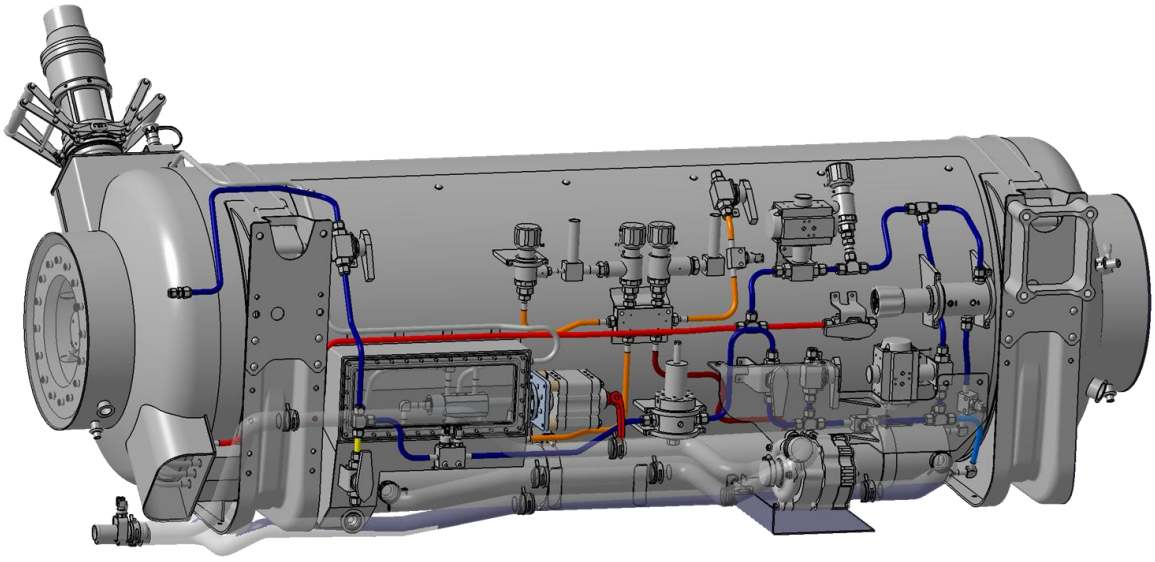


Abbildung 1 Fahrzeugpackage für ein 1-Tank CcH2-Speichersystem

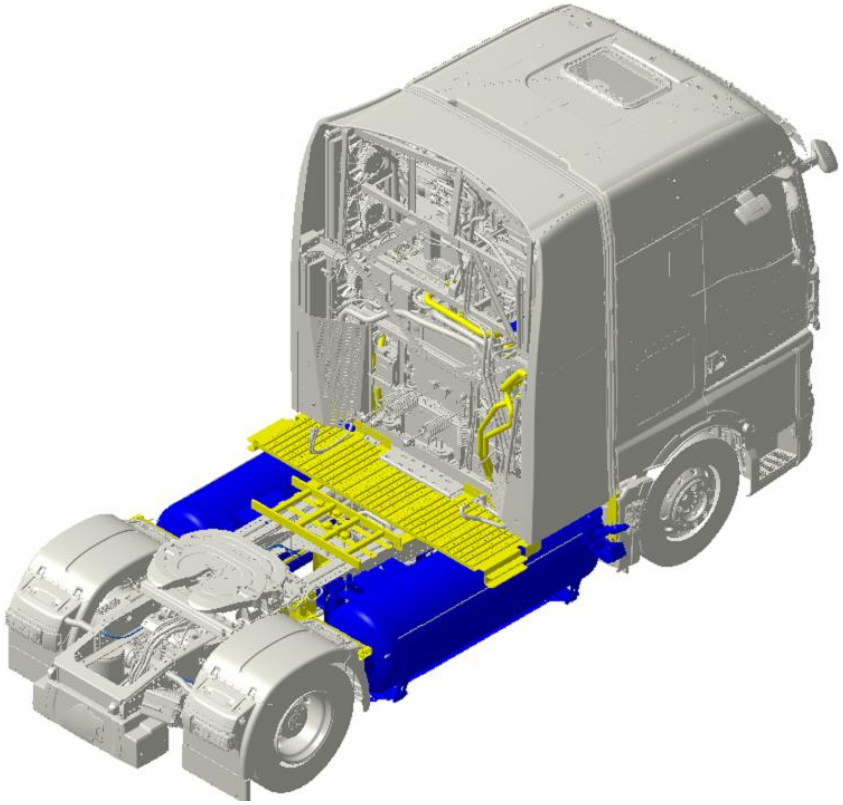


Abbildung 2 CAD-Modell des am Erprobungsträger angebauten 2-Tank Speichersystems

2.3. Arbeitspaket 2- Spezifikation und Anforderungen

AP2.1 Systementwurf

Aufbauend auf ersten Ergebnissen aus dem AP1 wurde ein 1D-Simulationsmodell aus einer Vielzahl von Systemkonfigurationen entwickelt und definiert. Dabei spielen thermodynamische, aber auch geometrische Einflussgröße, wie Leitungsdurchmesser, -längen und Strömungsquerschnitte eine entscheidende Rolle. Darüber hinaus wurden typische Betriebsfälle und -szenarien im Simulationsmodell abgebildet, um Erkenntnisse aus dem dynamischen Verhalten zur erlangen.

In einem zweiten Schritt wurde eine kleine Auswahl an Simulationsmodellen mit wissenschaftlichen Erkenntnissen optimiert. Dazu wurden Simulationsmodelle des Partners TUM-APT eingebunden, um verschiedene Betriebsszenarien zu optimieren und um Effekte abzubilden, welche in einem 1D-Simulationsmodell nicht gezeigt werden können. Im Ergebnis wurde ein kompletter Realzyklus (Betankung, Speicherung, Dormancy (verlustfreie Standzeit), Abgabe Wasserstoff (basierend auf Realfahrzyklus)) abgebildet und dadurch die Auslegung des Systems festgelegt.

Aus den Ergebnisses wurden Anforderungen abgeleitet und für die Entwicklung der Komponenten genutzt.

AP2.2 Spezifikation von Komponenten

Ausgehend von den relevanten technischen Standards und Regelwerken, den Ergebnissen aus AP2.1 und allgemeiner technischer Auslegungskriterien („best practise“) wurden sämtliche Komponenten beschrieben und spezifiziert.

AP2.3 Spezifikation des Systems

Die Konstruktion und der Bau von Komponenten und Systemen für Fahrzeuganwendungen unterliegen zahlreichen Normen, formalen Prozessen, Branchenpraktiken und internen Unternehmensverfahren. Um eine kohärente und strukturierte Grundlage für die Systemkonstruktion zu schaffen, wurden die wichtigsten Systemeigenschaften analysiert, bewertet und in der von Cryomotive erstellten Dokumentation der Systemspezifikation festgelegt.

Die Betriebseigenschaften der Systeme (1- und 2-Tankkonfiguration) wurden aus den Anforderungen des Fahrzeuges des Projektpartners MAN abgeleitet und als Auslegungsgrundlage für das CryoTRUCK-Projekt übernommen. Parameter wie Arbeitsdruck, Lieferdruck-Temperatur-Zuordnung, Ruhezustandsanforderungen, Systemdimensionierung, Ausrichtung und Schnittstellen wurden für das Projekt übernommen und als Input für weitere Arbeitspakete des Projekts verwendet.

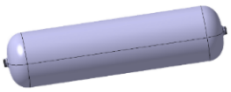
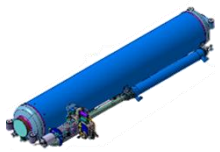
Zur Steuerung aller relevanter Anforderungen und Informationen im gesamten Entwicklungs- und Validierungsprozess wurde eine Softwarelösung evaluiert, beschafft und implementiert. Dadurch konnte ein „Model Based Systems Engineering“ (MBSE)-Ansatz erfolgreich umgesetzt werden und somit Grundlagen für weitere Entwicklungsschritte geschaffen werden.

2.4. Arbeitspaket 3- Komponentenentwicklung

AP3 umfasste die Arbeiten zur Entwicklung von Schlüsselkomponenten für den Bau und Betrieb der vorgeschlagenen CcH2-Speichersysteme. In enger Zusammenarbeit mit anderen Arbeitspaketen und unter Berücksichtigung ihrer Ergebnisse nutzte AP3 die Spezifikationen und Standardvorschriften aus AP2 sowie die mechanischen Konstruktionsvorgaben aus AP1. Die Komponentenentwicklung wurde

intern und mit strategischen Lieferanten und Partnern vorangetrieben. Bauteile an Schnittstellen wurden in enger Abstimmung mit den betroffenen Projektpartnern beschrieben und ausgelegt. Dazu ist die mechanische Fahrzeuganbindung im Besonderen zu benennen.

Die dem Projekt zugrundeliegende Entwicklungslogik ist in der folgenden Tabelle detailliert dargestellt. Darin sind die einzelnen Systemlevel und deren inhaltliche Zuordnung zu Unterarbeitspaketen in der Entwicklung (AP 2 &3) und Validierung (AP5) dargestellt. Entgegen der anfänglichen Planung wurde das Level5-System nicht realisiert.

CcH₂ CRYOGAS Speicher Systemlevel	**Umfang**	**Bild**	**Entwicklung**	**Experimentelle Absicherung**
Liner (Level 0)	Aluminium **Liner** aus nahtlosem Rohr oder über alternative Füge-Fertigungsmethode		AP 2.2. AP 3.1.	AP 5.6.
kryogener Drucktank (Level 1)	Liner umwickelt mit kryo-optimierter **CFK-Armierung**, vorgespannt über kryogenen **Autofrettage** Prozess		AP 2.2. AP 3.2.	AP 5.7.
kryogener Druckbehälter (Level 2)	Drucktank mit **Innentankwärmetauscher** (ITW), **Port-Verschlusskappen** und AL/St **Materialübergängen**		AP 2.2. AP 3.3.	AP 5.3. AP 5.8.
Isolierter kryogener Druckbehälter (Level 3)	Level 2 Tank + Isolierung mit einer **Mehrlagenisolation** (MLI) und isolierter Aufhängung Montage in **Vakuumhülle** („Hochzeit“) zum kryogenen Druckbehälter **sekundäres Vakuum** mit Materialübergängen für Rohre **Kaltventil**, **Blow-off Ventil**, **Abblase- und Sicherheitsventile**		AP 2.2. AP 3.4.	AP 5.2. AP 5.4. AP 5.9.
CcH₂ CRYOGAS Speicher (Level 4)	Level 3 Tank + **Innendruckregelventil** **Druckregler** **Kühlwasser-Wärmetauscher** **Sensoren** **Blow-off Management** **Mehrtankschnittstelle** (Cryo-Bridge) **Tankkupplung und Betankungsstrang**		AP 2.2. AP 3.5.	AP 5.3. AP 5.5. AP 5.10. AP 5.11.

CcH_2 CRYOGAS Fahrzeug-Speichersystem (Level 5)	Gesamtes **CcH2 CRYOAGAS Zweitank-Fahrzeugspeichersystem**		AP 4.	AP 5.11. AP 8 AP 9

AP3.1 Liner (Level 0)

In diesem Arbeitspaket wurde die Geometrie des Aluminiumliners, als Basis für einen Typ-3 Druckbehälter ermittelt. Neben den im AP2 ermittelten geometrischen Randbedingungen wurde die Umfangsgeometrie, insbesondere im Dome und BOSS-Bereich) mit den produktionstechnischen Grenzen abgeglichen. Dabei ist insbesondere der Zusammenhang aus marktverfügbaren Fertigungsmöglichkeiten, die optimale Ausnutzung des verfügbaren Bauraums und den Simulationsergebnissen des Druckbehälters zu nennen. Eine umfassende Marktrecherche ergab, das die Liner bei einem Lieferanten in den USA gefertigt werden müssen, da eine europäische Alternative nicht verfügbar war.

Aufgrund erster Testergebnisse wurde die Geometrie der Liner innerhalb des Projektes angepasst und mit dem Lieferanten abgestimmt. Die Anpassungen bezogen sich auf die geometrische Ausbildung des Dombereiches, um das Lebensdauerverhalten positiv zu beeinflussen.

Die Schnittstelle zur Lagerung des Innenbehälters wurde ebenfalls in diesem Arbeitspaket entwickelt, mit dem Lieferanten abgestimmt und realisiert. Dazu waren mehrere Iterationsschritte notwendig.

AP3.2 Kryogener Drucktank (Level 1)

Ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal zu anderen, marktverfügbaren Wasserstoffspeichersystemen ist die kryogene, also tiefkalte Speicherung von Wasserstoff unter hohem Druck (>300bar). Um dies zu ermöglichen wurde ein Drucktank entwickelt, der diesen Anforderungen gerecht wird. Aufgrund des Messkonzeptes und vorhandener Erfahrungswerte wurde ein Typ3-Druckbehälter gewählt, also ein Druckbehälter bestehend aus einem Aluminiumliner und einer Umwicklung mit Kohlestofffasern. Für die Auslegung konnte Cryomotive seine Erfahrungen aus vorangegangen Projekten erfolgreich einbringen.

Um die Anforderungen aus Temperatur und Druck zu erfüllen, wurden durch den Partner TUM-LCC und in Abstimmung mit Cryomotive geeignete und marktverfügbare Materialsysteme (Faser & Harz) ausgewählt und experimentell qualifiziert. Details dazu finden sich im Bericht des Partners TUM.

Im Rahmen des Projekts wurden zwei Technologien für die Herstellung der Behälter untersucht, nämlich das Nasswickeln und das Tow-Preg-Wickeln (Trockenwickeln mit vorlaminierten Fasern). Nach einer ersten Entwicklungsphase und der Herstellung von fünf Behältern mit der traditionellen Nasswickeltechnologie erkannte Cryomotive die Möglichkeit, die Produktionsprozesse für die Behälter durch die Trockenwickelmethode deutlich zu verbessern. Aufgrund der besseren Wiederholbarkeit, des geringeren Ausschusses und der besseren Kontrolle, die zu weniger Fehlern in der Umhüllung führen, wurde die Tow-Preg-Technologie als primäre Fertigungstechnologie anstelle der Nasswickeltechnologie festgelegt.

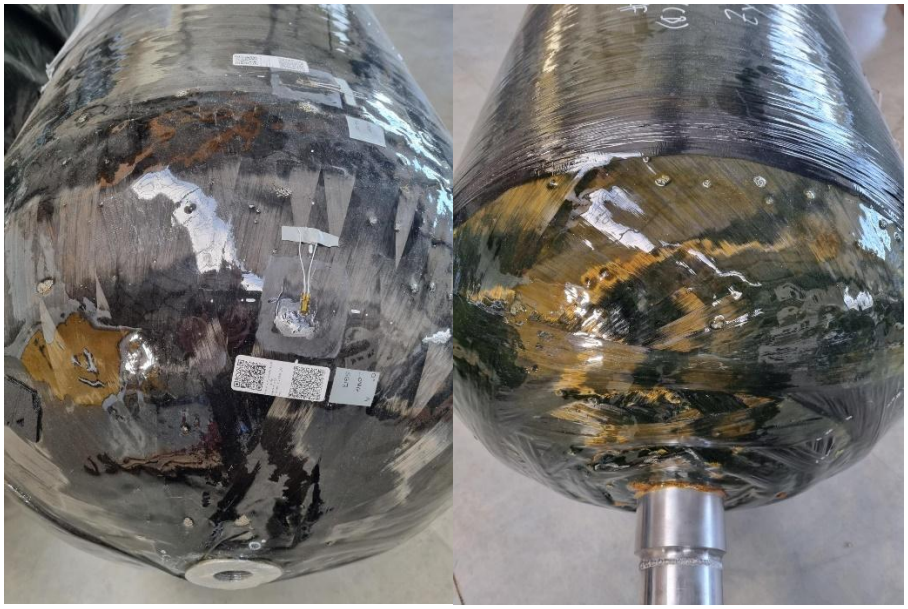


Abbildung 3 Beispiele für Cryomotive CcH2-Speicherbehälter der ersten (Nasswickeln - links) und zweiten (Towpreg - rechts) Generation

Da der Partner TUM-LCC über umfangreiche Erfahrungen in der Towpreg-Technologie verfügt, wurde in Abstimmung mit dem Fördergeber entschieden diese Arbeiten in die Verantwortung der TUM zu übergeben. Aufbauend auf den Ergebnissen aus der Nasswickeltechnologie wurden neue Simulationsmodelle aufgebaut, Materialtests durchgeführt und ein Wickelschema für das Trockenwickeln (Tow-Preg) entwickelt, welches durch die Cryomotive in der Produktion von Druckbehältern umgesetzt wurde. Im Vorfeld der Herstellung solcher Druckbehälter wurden fertigungsbegleitende Kontrollen und Qualitätsmaßnahmen definiert, um die Ergebnisse in einen kontinuierlichen Verbesserungsprozess (Wechselwirkung Simulation / Auslegung zu Produktion) einfließen zu lassen.

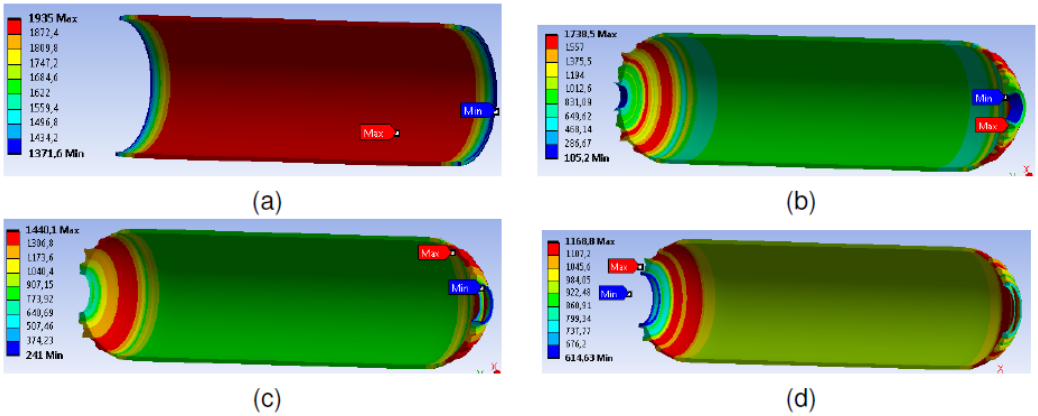


Abbildung 4 Modellierungsergebnisse der möglichen Konfiguration der Kohlefaserummantelung. Quelle: Masterarbeit, Lucas Ziemendorff, LCC, TUM

Die durch den Partner TUM-LCC entwickelten Simulationsmodelle wurden durch Cryomotive bewertet und mit eigenen Simulationen und Berechnungen abgeglichen, bzw. optimiert. Dies betraf vorwiegend die Ergebnisse zu Schädigungsverhalten und Autofrettage, ein Vorspannungs-Verfahren, das zur Erhöhung der Lebensdauer des Druckbehälters eingesetzt wird. Während des Betriebs wird der Behälter zyklisch befüllt und entleert, was zur Entstehung und Ausbreitung von Rissen führen kann, die

schließlich zu einem Versagen des Tanks durch Leckage oder Bersten führen. Beide Effekte müssen gemindert, und die Behälter müssen eine Lebensdauer aufweisen, die über die prognostizierte Lebensdauer hinausgeht, also einen Sicherheitsfaktor gegen Versagen aufweisen. Autofrettage ist ein Verfahren, bei dem ein Druckbehälter über seinen normalen Arbeitsdruck hinaus unter Druck gesetzt wird, um eine kontrollierte Verformung innerhalb der Aluminiumauskleidung zu erzeugen, die nach dem Druckabbau zu einer Druckeigenspannung führt. Behälter, die einem solchen Verfahren unterzogen wurden, zeichnen sich daher durch eine geringere Zugspannungsamplitude innerhalb der Innenfläche der Auskleidung aus, wodurch die Zeit bis zur Rissbildung verlängert und die Rissausbreitung behindert wird. Behälter, die einer Autofrettage-Behandlung unterzogen wurden, wurden im Rahmen des AP5 getestet. Die Ergebnisse sind in den folgenden Abschnitten des Berichts beschrieben.

Die Ziele des AP 3.2 konzentrierten sich auf die Herstellung von Behältern mit den für ihre Anwendung in den geplanten CcH2-Testaktivitäten erforderlichen Festigkeits- und Lebensdauerparametern sowie auf den Bau eines CcH2-Speichersystems für Lkw. Es wurden geeignete Behälter hergestellt, die die in AP2 für das CryoTRUCK-Projekt festgelegten Anforderungen erfüllen.

Es wurden positive Auswirkungen der Autofrettage-Behandlung beobachtet, die zu einer deutlichen Verlängerung der Lebensdauer der Tanks führten. Die erzielten Ergebnisse bilden eine gute Grundlage für die zukünftige Entwicklung der CcH2-Wasserstoffspeicherbehälter. Dabei oblag die Auslegung der Drucktanks dem Partner TUM und die Cryomotive hat die Herstellung der Tanks, nach Vorgaben der TUM verantwortet.

AP3.3 Kryogener Druckbehälter mit ITW, Boss und Materialübergängen (Level 2)

Die Entwicklungsarbeit von AP3 konzentrierte sich auf die Konstruktion und Qualifizierung von Behälterverschlussöffnungen, um einen gasdichten Betrieb des Speicherbehälters unter unterschiedlichen Temperaturen und Drücken während der gesamten Lebensdauer des CcH2-Systems zu gewährleisten. Während die aktuellen Wasserstofftanks für die gasförmige Speicherung nach Industriestandard mit Gewindeendstopfen mit Polymerdichtungen ausgestattet sind, war die Anwendung einer solchen Lösung aufgrund der kryogenen Betriebstemperaturen und der möglichen Versagensgefahr der Dichtungsmaterialien, die aufgrund der Installation des Tanks in einer geschlossenen Vakuumkammer nicht ausgetauscht werden können, nicht möglich. Daher hat sich Cryomotive für eine geschweißte Verschlusskonstruktion entschieden, um eine solide Verbindung zwischen der Aluminiumauskleidung und dem Verschlussstopfen herzustellen. Die große Wandstärke des Auskleidungsendes (Boss) und die geplante Industrialisierung der CcH2-Technologie führten dazu, dass das Elektronenstrahlschweißen als die vielversprechendste Verbindungstechnik für die Integration der Endöffnungen angesehen wurde. Die Entwicklung des Schweißverfahrens erfolgte in Zusammenarbeit mit einem Branchenführer im Bereich der Elektronenstrahlschweißtechnik (EB), um eine geeignete Verbindungsauslegung und Materialauswahl für den Stopfen zu ermitteln.

Im Rahmen von AP5 wurden Teil- und Vollversuche mit Testproben und Behältern durchgeführt, um die mechanische Eignung der Schweißverbindungen zu überprüfen. Die Ergebnisse werden in späteren Abschnitten des Berichts vorgestellt.

Die Integration des Wasserstoffspeichers in das Gasverteilungssystem stellte Cryomotive vor weitere Herausforderungen. Mechanische Anschlüsse, die routinemäßig in Gassystemen verwendet werden, wurden aufgrund der Gefahr von Leckagen in fahrzeuginternen Systemen durch Straßenvibrationen

als ungeeignet für den geschlossenen Langzeitbetrieb in einer Vakuumumgebung eingestuft. Daher entschied sich Cryomotive für die Entwicklung speziell angefertigter Verschlussöffnungen für den Speicher, die einen leckagefreien Langzeitbetrieb ermöglichen und gleichzeitig eine zuverlässige Verbindung zum Gasverteilungssystem gewährleisten. Während für den Behälterbau aufgrund seiner guten thermischen Eigenschaften, seiner geeigneten Festigkeits- und Massenparameter und seines günstigen thermischen Verhaltens für die Füllstandsmessung mittels Temperaturfühler eine Aluminiumauskleidung verwendet wurde, kam für den Bau des Gassystems Edelstahl zum Einsatz. Die zuverlässige Verbindung dieser beiden Materialklassen ist aufgrund ihrer unterschiedlichen Schmelztemperaturen und geringen Kreuzlöslichkeit eine bekannte technische Herausforderung, die herkömmliche Schweißverfahren ausschließt. Im Rahmen des Projekts wurden zwei Verbindungstechnologien untersucht: Reibschweißen und Explosionsschweißen.

Während das Reibschweißen in der Industrie erfolgreich für die Verbindung von Aluminium und Stahl eingesetzt wird, ergaben Prozessbewertungen und Tests im Rahmen von AP5 ungeeignete mechanische Eigenschaften der Verbindung und zeigten Schnittstellenfehler, die den Einsatz dieser Technologie für die Herstellung von CcH2-Behälterendstopfen ausschließen. Cryomotive hat daher den Schwerpunkt der Entwicklungsarbeit aufgrund der vielversprechenden Leistungsfähigkeit von Verbindungen unterschiedlicher Werkstoffe und ihrer Verwendung in kryogenen Anwendungen auf das Explosionsschweißen verlagert. Dazu wurden umfangreiche Simulationen und Berechnungen zusammen mit einem Lieferanten ausgeführt. Die Konstruktion der Aluminium-Edelstahl-Fittings basierte auf numerischen Modellen, bei denen die Leistungsfähigkeit der Materialverbindungen unter besonderer Berücksichtigung der Grenzflächenfestigkeit der Verbindung simuliert wurde. Es wurden Technologie-Screening-Arbeiten durchgeführt und geeignete Materialproben gekauft, die in AP5 einer vollständigen Prüfung unterzogen wurden.

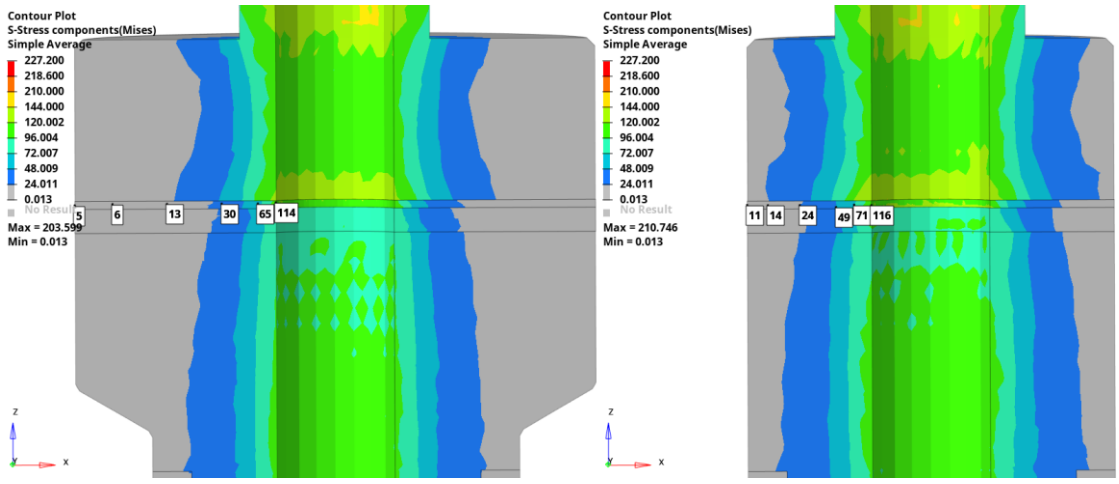


Abbildung 5 Spannungsverteilung unter Innendruck in zwei analysierten Geometrien für Bimetallkupplungen (rechte Geometrie im Prototyp verbaut)

Bimetall-Materialkupplungen wurden statischen und zyklischen Tests unterzogen, um die Betriebsdruckbedingungen des CcH2-Speichersystems nachzuahmen. Die erfolgreiche Durchführung der Tests ermöglichte es Cryomotive, diese Komponenten in vollwertige Level-2-Tanks zu integrieren und sie in den Milestone-2-Testaktivitäten einzusetzen. Die Ergebnisse werden im Abschnitt AP5 des Dokuments dargestellt.

Um eine optimale Flexibilität des CcH2-Speichersystems durch Maximierung der nutzbaren Wasserstoffmasse zu gewährleisten, wurde der Hochdruckbehälter mit einem Innentank-Wärmetauscher (IHEX) ausgestattet, der den Transport von Wärmeenergie zum gespeicherten Gas ermöglicht, wenn der Druck und die Temperatur im System durch Entnahme von Wasserstoff unter den Minimalwert fallen. Die Konstruktion des Wärmetauschers basiert auf einer thermodynamischen Modellierung des Systembetriebs, die auch als Grundlage für die Entwicklung der CcH2-Systemtanksteuerung diente, die in AP4 durchgeführt wurde. Aus Gründen der thermischen Kompatibilität und der Materialverbindung wurde der Wärmetauscher für die Herstellung aus schweißbaren Aluminiumlegierungen konzipiert. Da er im Vergleich zu den in diesem Bereich üblichen Standardprodukten unter extremen Bedingungen eingesetzt wird, nämlich bei kryogenem Wasserstoff, erforderte seine Konstruktion einen besonderen Ansatz. Darüber hinaus führte der Betrieb unter hohem Druck zu einer Knickgefahr, die zusammen mit einem möglichen Schweißnahtversagen als potenzieller Hauptversagensmechanismus erkannt wurde. Zur Bewertung der vom Unternehmen entwickelten Konzepte wurde eine numerische Modellierung durchgeführt, und es wurde ein endgültiger Entwurf erstellt, der in AP5 umfassenden Tests unterzogen wurde. Es wurden spezielle Fertigungs- und Montagekonzepte entwickelt, um eine wiederholbare Konstruktion des IHEX zu ermöglichen und dessen korrekte axiale Ausrichtung sicherzustellen, die ein kritischer Faktor beim Betrieb unter hohem Druck ist. Die Auslegungs- und Designarbeiten wurden ebenfalls von einem Lieferanten ausgeführt, basierend auf einem von Cryomotive entwickelten technischen Konzept.

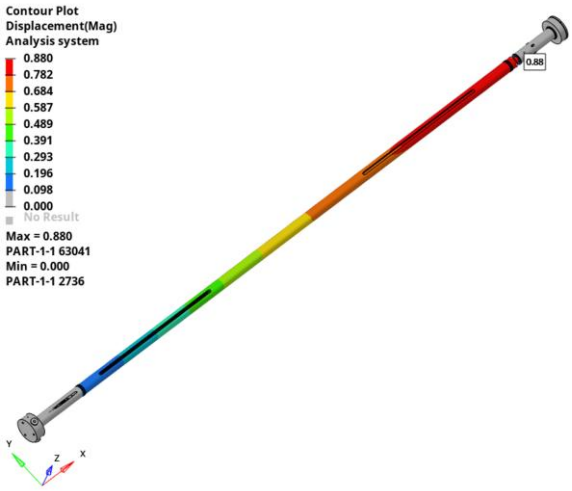


Abbildung 6 Auszug aus einer Modellierungsstudie zum internen Wärmetauscher, Verschiebung unter Druck

AP3.4 Isolierter kryogener Druckbehälter (Level 3)

Die Speicherung von kryogenem Hochdruckwasserstoff erfordert die Verwendung einer Vakuumhülle mit sekundären Maßnahmen wie Superisolierung und einer thermisch robusten Stützstruktur, um den Wärmeeintrag in das gespeicherte Gas zu minimieren. Obwohl die CcH2-Speichertechnologie thermisch deutlich robuster ist als LH2-Speicherverfahren, ist eine Wärmedämmung, wenn auch mit weniger strengen Anforderungen erforderlich, um die Haltezeit des Gases bei vollständiger Befüllung des Behälters zu maximieren.

Die Vakuumhülle war die Schlüsselkomponente, die im Rahmen von AP 3.4 entwickelt wurde. Ihr Design basiert auf der Zusammenarbeit zwischen Cryomotive und MAN, um eine korrekte Integration in

den verfügbaren Bauraum im Fahrzeug zu gewährleisten. Die Vakuumhülle, die auch als primäre Strukturkomponente des gesamten CcH2-Speichersystems dient, wurde mit zahlreichen sekundären Baugruppen und Komponenten ausgestattet, darunter:

- Installationsschnittstellen zur Befestigung von Hochdruckbehältern innerhalb der Vakuumhülle, im Folgenden als Kryolager bezeichnet,
- Rohrdurchführungen zum Anschluss des Tanks an das Hauptabsperrventil (OTV) und zur Versorgung und Rückführung von Wasserstoff zum und vom IHEX,
- Kabeldurchführungen zur Unterstützung des Betriebs von Temperatursensoren, die am Hochdruckbehälter installiert sind, um die Messung der Tanktemperatur und damit die Berechnung des Füllstands des Systems in Kombination mit der Druckanzeige zu ermöglichen,
- Sekundäre Vakuumbox, in der das Hauptabsperrventil untergebracht ist,
- Mechanische Halterung für Betankungsstutzen (CcH2 und H35).

Die Vakuumhülle wurde so konzipiert, dass sie optimal in den verfügbaren Bauraum passt, mit dem Ziel, die Herstellungskosten durch die Verwendung von möglichst standardmäßigen, auf dem Markt erhältlichen Komponenten zu minimieren. Daher wurden Standard-Edelstahlrohre verwendet, während das Design der Endverschlüsse auf der Anpassung von handelsüblichen Tankkopfgeometrien basiert. Die Fertigungsprozesse wurden von Cryomotive gemeinsam mit dem Lieferanten entwickelt, um eine angemessene Qualität und Ausrichtung der gesamten Behälterbaugruppe zu gewährleisten, damit der innere Druckbehälter korrekt in den Vakuumraum integriert werden kann, wie es die Konstruktion der kryogenen Lagerbaugruppen erfordert.

Abbildung 7 Vakuumschale nach Oberflächenvorbereitung und Durchgangsbohrung

In die Gehäusekomponenten wurden zahlreiche Öffnungen eingearbeitet, um die Anbindung von Gas- und Sensordurchführungen sowie die Installation wichtiger BOP-Komponenten wie Vakuumpumpanschlüsse, Drucksensoren und Überdruckschutzvorrichtungen zu ermöglichen. Wo möglich, wurden Standard-Flanschverbindungen (KF-basiert) verwendet, während die Gasdurchführungen speziell entwickelt wurden, um eine Schweißverbindung zwischen den Durchführungen und dem Gehäuse zu ermöglichen und so das Risiko einer Beschädigung der Durchführungen durch den intermittierenden Durchfluss von kryogenem Gas durch die Rohrleitungen zu minimieren.

Um die thermische Leistung des Systems zu verbessern und den Wärmeeintrag in das gespeicherte Gas zu reduzieren, wurde eine mehrschichtige Isolierung (MLI) auf den Innenbehälter aufgebracht, um

die Auswirkungen der Wärmestrahlung zu minimieren. Die Leistung der MLI wurde von Cryomotive modelliert, um sicherzustellen, dass die erwartete Leistung mit bestimmten Materialien und Schichtkonfigurationen erreicht werden kann. Cryomotive arbeitete mit führenden Unternehmen der Isolierstoffherstellung zusammen und beschaffte vorgefertigte MLI-Decken sowie unterstützende Materialien wie vakuumstabile Klebebänder und Schweißschutzmatten, um eine optimale Installation der Isolierung auf dem Hochdruckbehälter zu ermöglichen. Der Montageprozess wurde intern unter Verwendung von Geräten und Verfahren durchgeführt, die im Rahmen des CryoTRUCK-Projekts entwickelt wurden.

Eine der Herausforderungen bei der Integration von Druckbehälter und Außenhülle war die Entwicklung einer geeigneten Stützstruktur, die beide Behälter miteinander verbindet. Kryogene Lager müssen in einem breiten Temperaturbereich arbeiten, Temperaturgradienten von fast 300 K innerhalb ihrer Baugruppe standhalten, eine ausreichende thermische Widerstandsfähigkeit bieten und gleichzeitig während des Betriebs des Fahrzeugs eine hohe mechanische Integrität aufweisen und bei einem möglichen Aufprall des Fahrzeugs eine sicherheitskritische Funktion erfüllen (festgelegt auf 10 g als internes CryoTRUCK-Konstruktionsziel).

Im Rahmen des Projekts wurden zahlreiche Konzepte für die Lagerkonstruktion entwickelt, wobei die optimale Lösung auf der Grundlage der mechanischen Festigkeit, Umweltverträglichkeit und thermischen Leistung ausgewählt wurde. Das ausgewählte Lager wurde einer virtuellen Validierung unterzogen, bei der seine thermische und mechanische Leistung (statisch, Vibration und Stoß) modelliert wurde, um die Konformität mit den in AP2 entwickelten internen Konstruktionsanforderungen sicherzustellen.

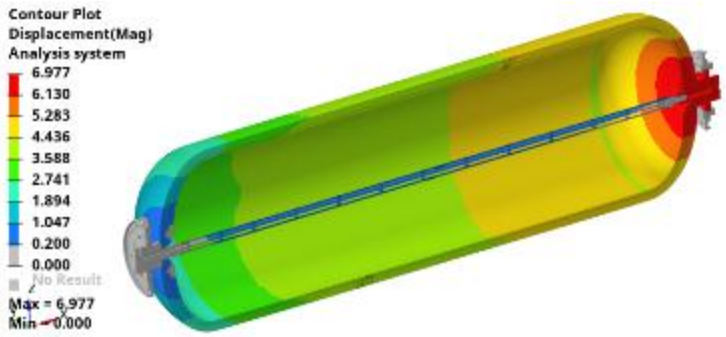


Abbildung 8 Auszug aus einer Modellierungsstudie zu kryogenen Stützlagern (Auswirkungen der Verformung auf Durchbiegungen)

Die Konstruktion der Komponenten, aus denen die Vakuumbaugruppe besteht, wurde stark von den Anforderungen des Montageprozesses und den daraus resultierenden Anforderungen an Abstände, Toleranzen sowie dem Verarbeitungsansatz beeinflusst. Cryomotive hat maßgeschneiderte Montagevorrichtungen entwickelt, um den Qualitätsanforderungen gerecht zu werden und eine sichere und schnelle Integration des CcH2-Wasserstoffspeichersystems zu ermöglichen.

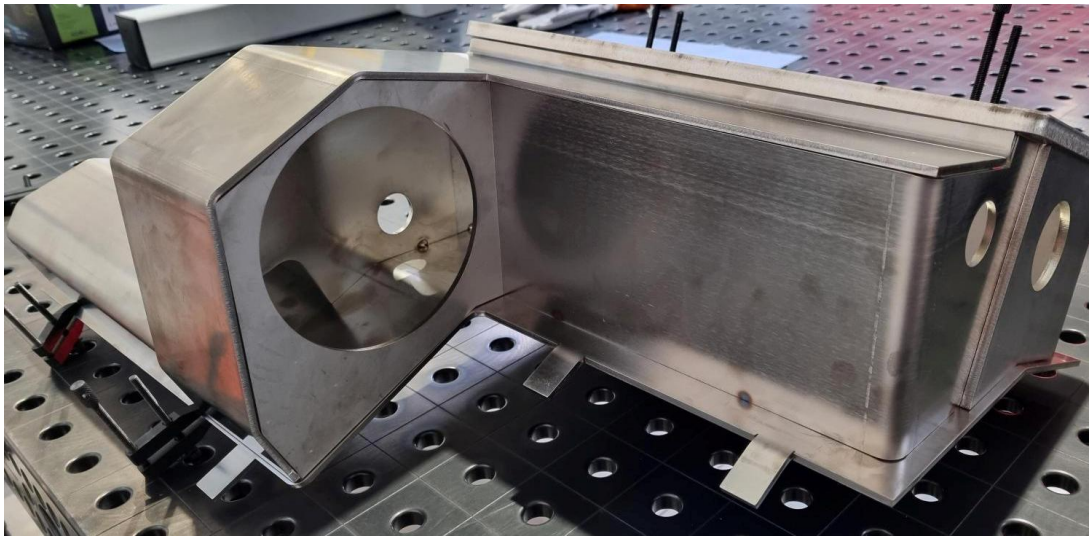


Abbildung 9 Sekundäre Vakuumeinheit vor dem Schweißen

Neben der Tankintegration und der Vakuumtechnik umfasst AP 3.4 auch die grundlegende Sicherheitsinfrastruktur des CcH2-Speichersystems, darunter:

- Primäres Druckisolationsventil, OTV (Kaltventil),
- Abblaseventil (BOV),
- Überdruckschutzventile (PRV 1 und PRV 2, zwei Druckstufen),
- Thermoschutzventil, TPRD.

Es ist von größter Bedeutung, dass das Wasserstoffspeichersystem sowohl während des Betriebs als auch in Notfällen zuverlässig geschlossen werden kann, um einen unkontrollierten Wasserstoffaustritt aus dem Druckbehälter zu vermeiden. Um diesem Bedarf gerecht zu werden, hat Cryomotive zusammen mit einem führenden Industriezulieferer ein luftbetätigtes kryogenes Hochdruck-Wasserstoff-Absperrventil (OTV) entwickelt. Das Ventil ist mit einem internen Rückschlagventil ausgestattet, um das Betanken des Tanks zu ermöglichen, sowie mit einem Bypass, der den Hochdruckbehälter direkt mit den Überdruck- und Übertemperaturschutzventilen verbindet. Das normalerweise geschlossene OTV würde durch die Druckluftversorgung des Lkw betätigt werden, die von der im Rahmen des CryoTRUCK-Projekts entwickelten Tanksteuereinheit gesteuert wird.

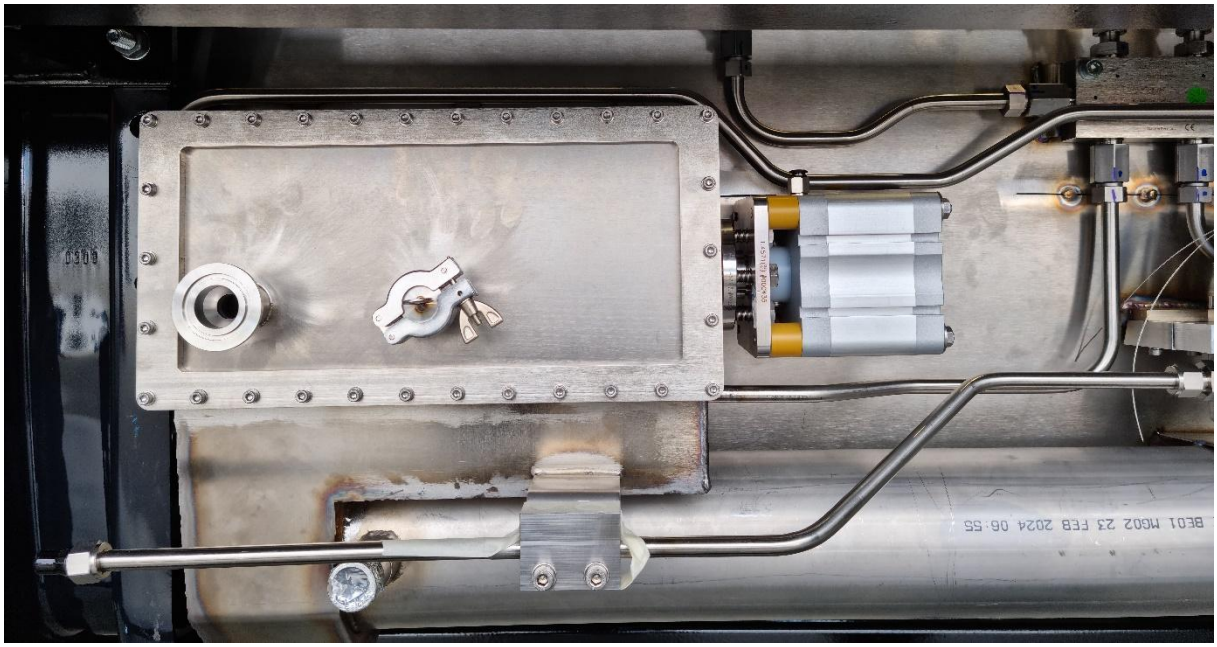


Abbildung 10 Sekundärvakuum mit Verschlussdeckel, OTV-Stellantrieb sichtbar (rechts)

Der Überdruckschutz des Systems wurde in drei Stufen realisiert, um sämtlichen Anforderungen an Regulatorik und Betriebssicherheit gerecht zu werden. Aufgrund des unvermeidlichen Wärmeeintrags in das gespeicherte Gas ist im Betrieb mit einem langsamen Druckanstieg zu rechnen, der nach Erreichen des Abblasedrucks dann über ein Ablaseventil (Blow-off-Ventil) geregelt wird. Mit einem maximalen Fülldruckziel von 400 bar und einem Ablasedruck von 450 bar kann das System je nach Füllstand, Fahr- und Haltezeiten sowie Umweltfaktoren eine bestimmte Ruhezeit (ohne Entlüftung) erreichen. Bei längeren Haltezeiten würde das Ablaseventil intermittierende Entlüftungsvorgänge durchführen und so den Behälter vor Überdruck schützen.

In Übereinstimmung mit den besten Branchenpraktiken und Konstruktionsvorschriften wurde das System durch sicherheitsbewertete Überdruckventile geschützt. Zur Erhöhung der Systemsicherheit wurde eine doppelte Druckredundanz implementiert. Während das Ablaseventil dazu dient, den Druck im Normalbetrieb zu begrenzen, sind die PRV-Einheiten für Notfälle wie den Verlust des Vakuums aufgrund von Leckagen oder Unfällen ausgelegt, wenn sich durch hohen Wärmeeintrag schnell Druck im System aufbauen kann. Diese Systemkonstruktion ermöglicht eine sichere und kontrollierte Wasserstoffentlüftung und bietet somit einen hohen Schutz für den Wasserstoffbehälter und damit auch für die Nutzer des Speichersystems.

Abbildung 11 Abblaseventil (links) und zwei Überdruckventile (am Gasverteilungsblock, rechts) am Gaspanel installiert

Wasserstoffspeicher in Fahrzeugen müssen im Brandfall vor Beschädigung geschützt werden. Bei herkömmlichen Gasspeichern kann Feuer die Kohlenstofffaser-Ummantelung beschädigen und schwächen, was den Einsatz eines temperaturgesteuerten Thermoschutzventils (TPRD) erforderlich macht. Beim CcH2-Speichersystem bietet die Vakuumhülle zusätzlichen Brandschutz. Gemäß den aktuellen Vorschriften für transportable Wasserstoffspeichersysteme hat Cryomotive zusätzlich ein TPRD-Ventil installiert um den Sicherheitsanforderungen gerecht zu werden.

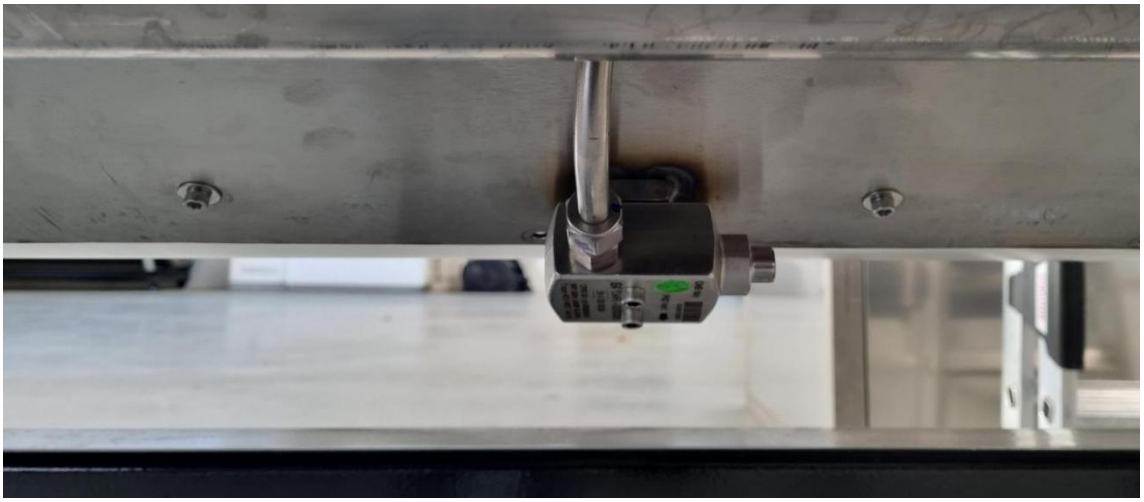


Abbildung 12 TPRD an der Unterseite des CcH2-Speichersystems installiert

Alle Schutzvorrichtungen wurden anhand der im Rahmen des CryoTRUCK-Projekts festgelegten Anforderungen ausgewählt oder entwickelt. Es wurden Berechnungen und Modellierungen durchgeführt, um sicherzustellen, dass die Leistung der Schlüsselkomponenten den Anforderungen des Systems in Bezug auf Durchfluss und Druck entspricht. Die Spezifikationen für ihre Lieferung wurden aus entsprechenden Vorschriften abgeleitet, sofern solche verfügbar waren, oder speziell für die Anforderungen des Projekts erstellt und spielen eine Vorreiterrolle für die Zukunft der CcH2-Anwendung in Lkw.

AP3.5 CcH2 CRYOGAS Speicher und CcH2 CRYOGAS Speichersystem

Die Integration des Systems erfolgte nach den in früheren AP abgeschlossenen detaillierten Konstruktionsstudien, um die korrekte Positionierung jeder der Komponenten innerhalb der kompakten Einbauräume des Fahrzeugs sicherzustellen. Im Rahmen des Projekts wurden zahlreiche Montagetechniken eingesetzt, um eine zuverlässige mechanische Integration der Komponenten sowie eine gasdichte Integration des Gassystems zu gewährleisten. Als primäre Verbindungsmethode für die Rohrleitungen wurde das Schweißen gewählt, während für alle Gaskomponenten außerhalb der Vakuumkammer Klemmringverschraubungen verwendet wurden, um im Falle einer möglichen Fehlfunktion den Austausch von Komponenten zu ermöglichen. Die Auswahl der Rohrleitungen und die Verbindungstechniken basieren auf dem Stand der Technik und der Erfahrung der Mitarbeiter von Cryomotive, um eine korrekte, sichere und zuverlässige Installation aller Komponenten des Gassystems zu gewährleisten.

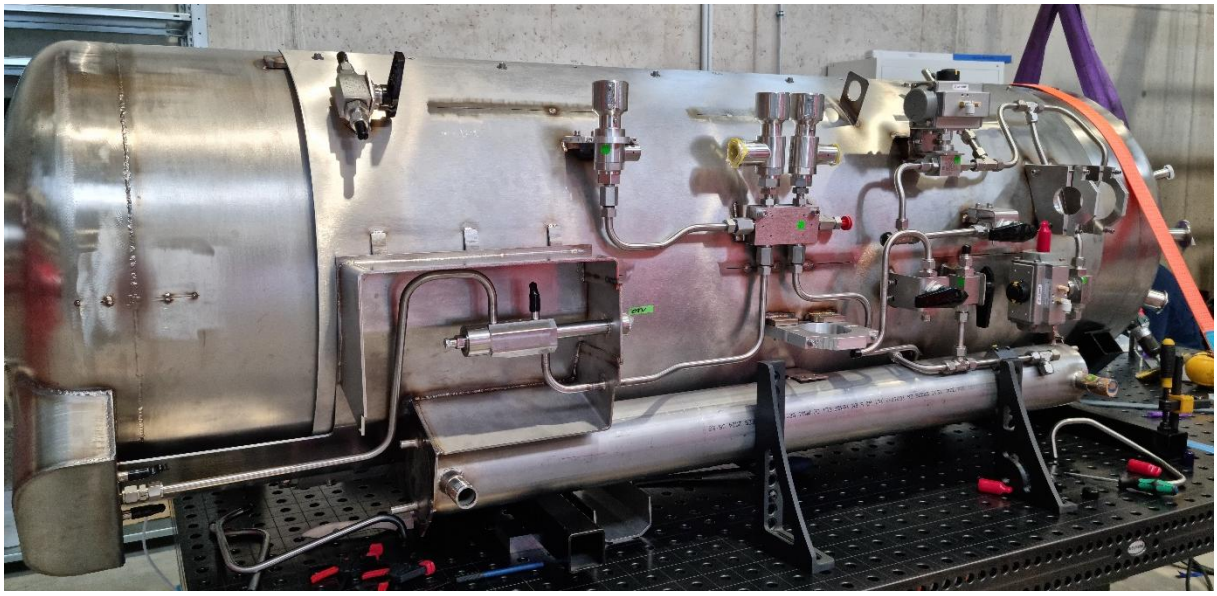


Abbildung 13 Gaspanel nach Integration mit dem Vakuumtank

Die Bereitstellung des Wasserstoffs erfolgt durch zwei Druckregler. Dadurch wird sichergestellt, dass das durch MAN spezifizierte Druckniveau, in Verbindung mit dem geforderten Massenstrom, zuverlässig bereitgestellt werden kann. Zwei Regler wurden verwendet, um den Betrieb von IHEX bei mittleren Druckniveaus zu ermöglichen, wodurch die allgemeine Sicherheit und Zuverlässigkeit des Systems erhöht wurde, während die erforderliche thermische Leistung des Wämetauschs beibehalten wurde, die durch detaillierte thermodynamische Modellierungsstudien von Cryomotive und der TUM sichergestellt wurden. Darüber hinaus ermöglichte der Einsatz von zwei in Reihe geschalteten Druckreglern eine verbesserte Regelung des Wasserstoffversorgungsdrucks der Brennstoffzelle im Vergleich zu einer einstufigen Konstruktion, wodurch das Risiko einer möglichen Überdruckbeaufschlagung und Leistungsänderungen bei unterschiedlichen Betriebsdrücken und Temperaturen im Wasserstoffspeichersystem verringert wurde.

Um den thermischen Kreislauf des CcH2-Speichersystems zu vervollständigen, wurde ein externer Wärmetauscher entwickelt, der den aus dem Tank austretenden Wasserstoff erwärmt und dessen Zufuhr zur Brennstoffzelle oder Umleitung zum IHEX ermöglicht. Der externe Wärmetauscher wurde daher mit zwei Wasserstoffdurchgangsrohren ausgestattet, einem primären (FC- oder IHEX-Zufuhr) und einem sekundären (IHEX-Rücklauf), und als Rohr-in-Rohr-Einheit konzipiert. Bei der Konstruktion des

Wärmetauschers wurden numerische Berechnungen und Modellierungen verwendet, um eine angemessene thermische Leistung der Einheit und ihre Fähigkeit, Wasserstoff im erwarteten Temperaturbereich an die Brennstoffzelle zu liefern, sicherzustellen. Zusätzlich zur Bewertung des stationären Zustands wurde auch der Kaltstart untersucht, um maximale Systemflexibilität und Nutzbarkeit bei minimalen Startzeiten zu gewährleisten. Zusammen mit dem Projektpartner MAN wurde eine Modellierung durchgeführt, um die thermische Wechselwirkung zwischen dem Cryomotive CcH2-Speichersystem und dem Fahrzeugkühlsystem zu verstehen.

Der Betrieb des internen Wärmetauschers wurde über zwei im Wasserstoffsystem installierte Durchflussregelventile gesteuert. Der aus dem CcH2-Behälter über das Tankventil austretende Wasserstoff wurde durch den externen Wärmetauscher geleitet und entweder direkt in Richtung Antriebsschnittstelle geführt oder zum internen Wärmetauscher umgeleitet. Der Systembetrieb wurde von einer im Rahmen des CryoTRUCK-Projekts entwickelten Tanksteuereinheit (TCU) gesteuert, die mit zahlreichen Temperatur- und Drucksensoren im Gassystem verbunden war und dessen Zustand kontinuierlich überwachte. Die Entwicklung der TCU-Ausrüstung und der Steuerungsstrategie wird in AP 4.2 beschrieben. Die Auswahl der Sensoren basierte auf der Verfügbarkeit von Sensoren mit automotiver Eignung , die die für den Einsatz im Fahrzeug erforderlichen Eigenschaften, Schnittstellen und Zuverlässigkeitsmerkmale aufweisen.

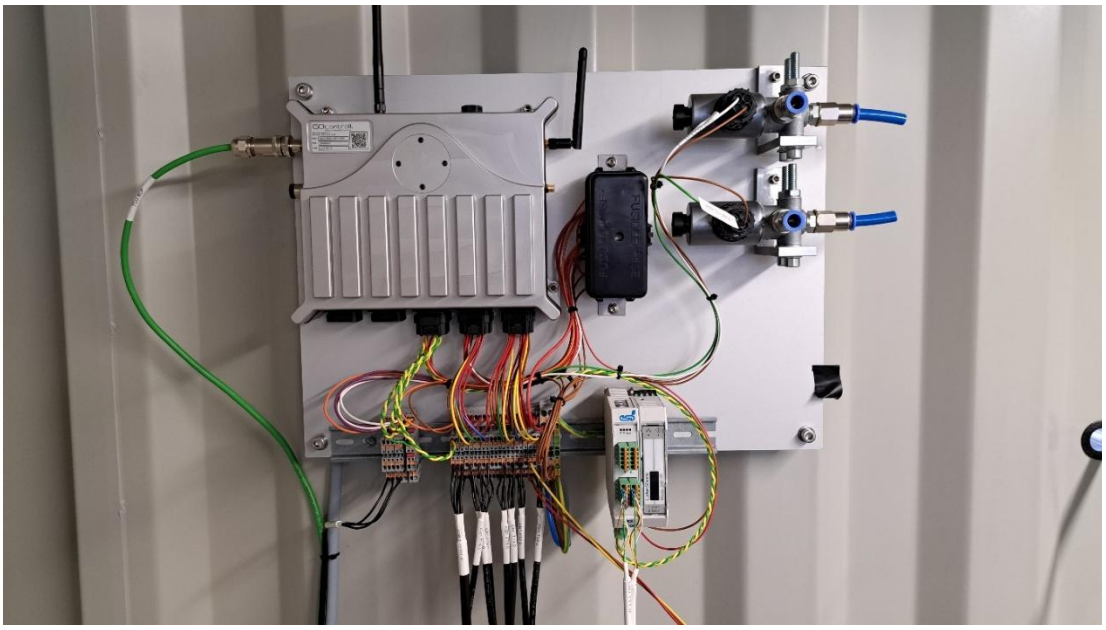


Abbildung 14 Tanksteuergerät (TCU) mit Netzwerk- und Funkkommunikation, Temperatursensor-Eingabeeinheiten, Kfz-Sicherungskasten und pneumatischen Ventilen

Die Entwicklung der Betankungsausrüstung wurde mit der Fertigstellung des CcH2-Betankungssystems abgeschlossen, bei dem die Betankungskupplung von einem Partnerunternehmen von Cryomotive entwickelt und hergestellt wurde. Der Tankstutzen wurde gemäß den im Rahmen des CryoTRUCK-Projekts festgelegten Tankparametern und in Übereinstimmung mit den räumlichen und Integrationsanforderungen des Speichersystems konstruiert. Der Tankstutzen wurde für den Einbau in ein sekundäres Vakuumsystem konzipiert, um ein sicheres und schnelles Tanken mit minimalen Wärmeverlusten zu ermöglichen.

Das komplette CcH2-Speichersystem zusammen mit der zusätzlichen TCU sowie dem CcH2-Spender wurde im Rahmen von AP5 getestet. Ausgehend von den Anforderungen und Standardarbeiten über detaillierte Modellierungs- und Konstruktionsprozesse bis hin zu strukturierten Produktions-, Vorabtest- und Montagephasen zeigte das fertige CcH2-Speichersystem die erwarteten Funktionen und Steuerungsparameter und bestätigte damit seine Funktionsfähigkeit und Bereitschaft für die weitere Validierung und Prüfung.

2.5. Arbeitspaket 4- Systementwicklung

Das Ziel des Arbeitspakets ist die Entwicklung des CcH2 Speichersystem-Versuchsträgers mit Schwerpunkt auf die Entwicklung und Applikation der Steuerung, Einbau eines Mockups in die Lkw zur Absicherung der Passgenauigkeit und die Übermittlung eines funktionsfähigen Speichersystems an die Absicherung auf dem Prüfstand.

AP4.1 Simulation und Auslegung, Steuerungsentwicklung

Die Funktionen für ein 1-Tank-System und ein 2-Tank-System wurden unter Rücksichtnahme der Ergebnisse aus AP 2.3 (Funktionale Sicherheit, etc) erstellt und den entsprechenden Sensoren und Aktoren im System, siehe P&ID, zugewiesen. Das Dokument „Sensor_Function_Mapping“ in der Version 0.4 beschreibt diese Zuordnung.

In Abstimmung mit dem Partner MAN wurde das Dokument „Vehicle_EE_Control_Specification“ in der Version 0.7 erstellt, welches die Anforderungen der einzelnen Funktionen sowie die Systemlogik beschreibt. Das Dokument „Sensor_Function_Mapping“ beinhaltet neben der Funktionszuweisung auch einen Vorentwurf des Systemschaltplans (2-Tank-System) der es ermöglicht die Feldgeräte (Sensoren, Aktoren) auf die Steuerungseinheit (TCU, siehe Abbildung 14) abzustimmen.

Die Systemhardware gemäß P&ID wurde in der MATLAB/Simscape Umgebung nachgebildet und die Funktionen der TCU in Software überführt. Dieses Modell wurde für die Validierung der Systemlogik mittels MiL (Model in Loop) herangezogen. Nach erfolgreicher Validierung wurde im nächsten Schritt das Softwaremodell der TCU durch maschinennahen Code ersetzt und erneut getestet (SiL; Software in Loop). Es handelt sich dabei um Code in der Form wie er im physischen Steuergerät verarbeitet wird. Wesentliche Funktionen der Steuerungslogik des 1- und 2-Tank-Systems konnten somit in der Software validiert werden. Funktionen welche eine Schnittstelle zum Fahrzeug voraussetzen, konnten nicht validiert werden. Der Ergebnisse dieser Arbeitenim Zusammenspiel mit AP6, konnten deshalb nicht gezeigt werden.

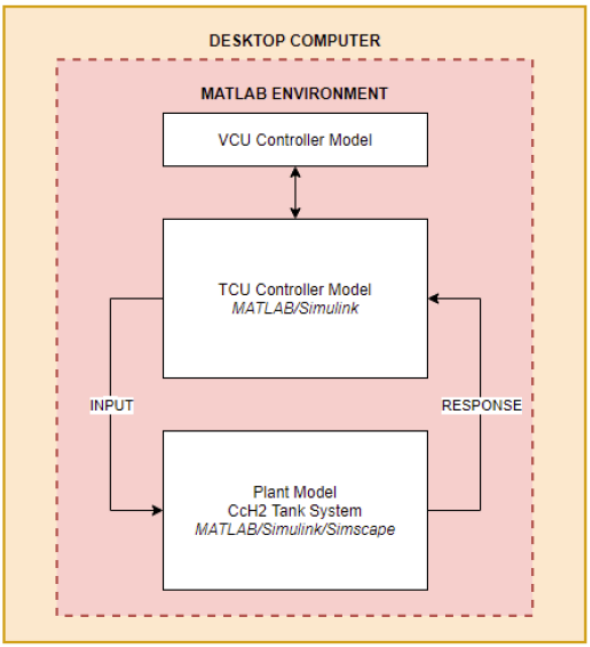


Abbildung 15 Blockdiagramm der Steuerung – Modellschnittstelle

AP4.2 Applikation Steuerung

Die Definition der Softwareanforderungen wurde erstellt und in der internen Datenbank zum Anforderungsmanagement dokumentiert (ReqSuite, siehe AP2.3). Zudem ergeben sich aus der Funktionalen Sicherheitsbetrachtung gemäß ISO 26262 ebenfalls Anforderungen welche im Dokument „Functional Safety Concept CryoTRUCK“ definiert sind. Basierend auf den Ergebnissen des AP 4.1 wurden geeignete Sensoren und Aktoren ausgewählt. Bei der Auswahl des Steuergeräts wurde der Fokus auf Flexibilität und die Erprobung des Prototypen gelegt. Die Steuerung erfüllt somit alle Anforderungen die sich aus der Funktionsdefinition ergeben, jedoch nicht jene der ISO 26262. Die Umsetzung der Anforderungen gemäß ISO 26262 erfolgt in der Regel mit der Serienqualifikation. Eine Umsetzung im Rahmen des Forschungsvorhabens war, aufgrund des Umfanges und Aufwandes, nicht darstellbar.

Gemeinsam mit dem LKW-Partner MAN wurde ein Sicherheitskonzept erarbeitet, welches den Anforderungen, die an den Erprobungsversuchsträger gestellt werden, genügt.

Neben der in AP4.1 erwähnten Schnittstellendokumentation wurde die Kommunikation mit der Fahrzeugsteuerung (VCU) für ein 1- und 2-Tank-System abgestimmt und im Dokument „CMO_Cryotruck_TCU_CAN_MATRIX_daft“ in der Version 0.8 definiert.

Im nächsten Schritt wurde für den Schaltplan der aus AP4.1 erstellte Entwurf in einen Systemschaltplan überführt. Die gesamte Dokumentation der Kommunikation des Tanksystems und dessen Schnittstellen in Hardware und Software wurde somit abgeschlossen. Die Entwicklung eines Kabelbaums erfolgte für den stationären Betrieb des Systems und enthält daher keine Schnittstelle zum Fahrzeug. Für ein 1-Tank-System wurde seitens MAN auf Grundlage der Schnittstellendokumentation und des Systemschaltplans mit der Entwicklung eines Kabelbaums für den Erprobungsversuchsträger begonnen.

Nach der SiL-Erprobung wurde die Software auf das Steuergerät aufgespielt. Ein Software Interface (Dashboard) wurde entwickelt um einerseits wesentliche Parameter während der Erprobung anpassen zu können und andererseits sämtliche Messsignale und Systemzustände visualisieren und

protokollieren zu können. Es ist dadurch möglich 145 Signale pro Sekunde aufzuzeichnen und gezielt auszuwerten.

Der Einbau des Steuergeräts in den Versuchsträger konnte nicht durchgeführt werden da ein entsprechendes Fahrzeug noch nicht zur Verfügung stand. Der Einbau kann erst erfolgen sobald der Kabelbaum vollständig im Fahrzeug installiert ist. Um trotzdem wesentliche Funktionen in der Hardware zu testen, wurde ein Testsystem entwickelt, welches alle Komponenten des Tanksystems beinhaltet und wesentliche Fahrzeugsignale emuliert. Mittels des oben erwähnten Dashboards konnten somit grundlegende Funktionalitäten auf Hardwareebene erfolgreich gezeigt werden.

Abbildung 16 Konfiguration des TCU-Bedienfelds/der Datenanzeige, Konfiguration der Hauptebene

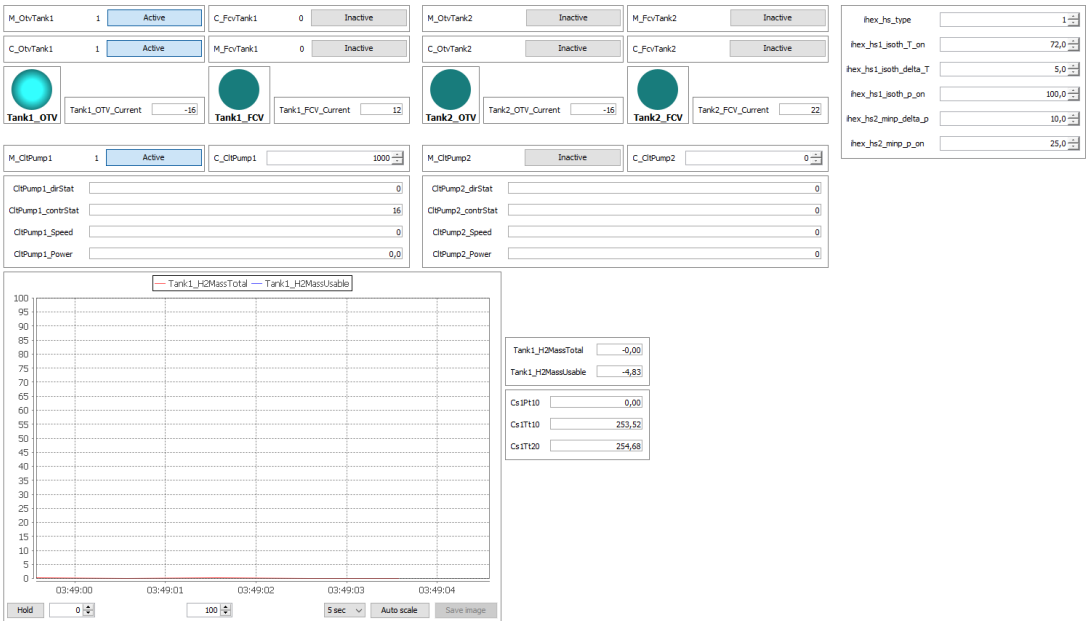


Abbildung 17 Konfiguration der TCU-Tankfüllstandsanalyse und -aufzeichnung

AP4.3 Montage Mockup- und Erprobungssysteme, Abnahme Erprobungssystemeinbau

Montage des Mock-up-Systems

Während der Laufzeit des CryoTRUCK-Projekts wurden ein Modell (Mock-up) und ein komplettes CcH2-Speichersystem (1-Tank) gebaut. Im Anschluss an den Bau des Mock-ups wurden zunächst zahlreiche spezielle Montagevorrichtungen entworfen und gebaut, um eine sichere und präzise Handhabung und Montage des ersten CcH2-Speichersystem-Demonstrators zu ermöglichen.

Das Mock-up-System wurde entworfen und gebaut, um den Projektbeteiligten Erfahrungen in der Konstruktion, Fertigung und Montage von Vakuumgehäusen zu ermöglichen und um Handhabungstechniken für CcH2 Wasserstoffspeichersysteme in Fahrzeuggröße zu entwickeln. Der Montageprozess des Mock-ups brachte zahlreiche Herausforderungen und Verbesserungsmöglichkeiten für die Konstruktion der Vakuumhülle zutage, die bei der Fertigung des CcH2-Speichersystem-Demonstrators umgesetzt wurden. Nach seiner Fertigstellung wurde das Mock-up verwendet, um die Gesamtkonfiguration des CcH2-Speichersystems bei Partner- und Investorenveranstaltungen in den Produktionsstätten des Unternehmens zu präsentieren.

Abbildung 18 CcH2-Demonstrationssystem (links, vorne) und CcH2-Tankmodell (rechts, hinten)

CcH2-Speichersystem-Demonstrator

Basierend auf den Erfahrungen aus der Montage des Mockups konnte das Design des Demonstratorsystems in Details angepasst werden. Dies diente als Voraussetzung für die Beschaffung der erforderlichen Materialien, Komponenten und Instrumente durch Cryomotive. Die Inspektion und Ersteinrichtung bestimmter Komponenten wurde vorab durchgeführt, um eine schnellere Integration zu ermöglichen. Dazu gehörten die Überprüfung der Sensoren, die Voreinstellung der Ventile, die Vormontage der Armaturen sowie die Herstellung und das Schweißen von Halterungen und Haltevorrichtungen. Cryomotive hat den Demonstrator-Kryo-Druckbehälter im eigenen Haus hergestellt und ihn einer hydraulischen Druckprüfung in den hydraulischen Prüfeinrichtungen der IABG in Dresden unterzogen.

Die Vakuumhülle und der Druckbehälter wurden mit speziell entwickelten Verfahren gereinigt, um einen minimalen Gehalt an Restöl und Feuchtigkeit auf ihren Außen- und Innenflächen zu gewährleisten. Es wurden Proben des Reinigungsmediums aus dem Druckbehälter entnommen, um den anfänglichen Verschmutzungsgrad zu ermitteln und die Produktionsprozesse in Zukunft zu verbessern. Schließlich wurden die Behälter mit ölfreier, entfeuchteter Luft getrocknet und für die Endmontage gelagert.

Konfiguration der Montage

Während der Entwurfsphase des Projekts wurden verschiedene Konzepte hinsichtlich der Konstruktion für die Montage und der Auswahl des Montageverfahrens analysiert. Letztendlich wurde die vertikale Montage der Behälter in Behältern gegenüber dem horizontalen Ansatz bevorzugt, da sich die Konzentrizität zwischen dem inneren und dem äußeren Behälter dadurch leichter sicherstellen lässt. Das Kraft- und Spannungsmanagement während der Handhabung der Behälter wurde ebenfalls als ein wichtiger Faktor während der Montage angesehen, da beim Verriegeln der relativen Positionen der Behälter während der Lagerinstallation keine Restbiegemomente zu erwarten waren. Darüber hinaus kann dadurch die endgültige Verschweißung der Vakuumhülle (Umfangsschweißnaht zwischen zylindrischem Abschnitt und Verschlusskuppel) ebenfalls unter spannungsfreien Bedingungen erfolgen, wodurch das Risiko einer Fehlausrichtung und eines fehlerhaften Lagerbetriebs oder einer MLI-Kompression aufgrund des Kontakts zwischen Innen- und Außenbehälter verringert wird.

Cryomotive hat einen Montageturm entworfen, der als Hauptführungs-, Stütz- und Sicherheitsstruktur für die Systemmontage dient. Der Turm war mit einer Vorrichtung zur Positionierung und Justierung der Vakuumhülle ausgestattet, die von einem Sekundärrahmen (mit weiterer Justiermöglichkeit) sowie einer Vorrichtung zum Anheben und Positionieren des Druckbehälters gestützt wurde. Die Positionierung und Ausrichtung aller Unterbaugruppen innerhalb des Turms ermöglichte die Justierung und Kontrolle der relativen Positionen der Behälter und stellte letztendlich den erfolgreichen Abschluss des Montageprozesses des CcH2-Demonstrationssystems sicher.

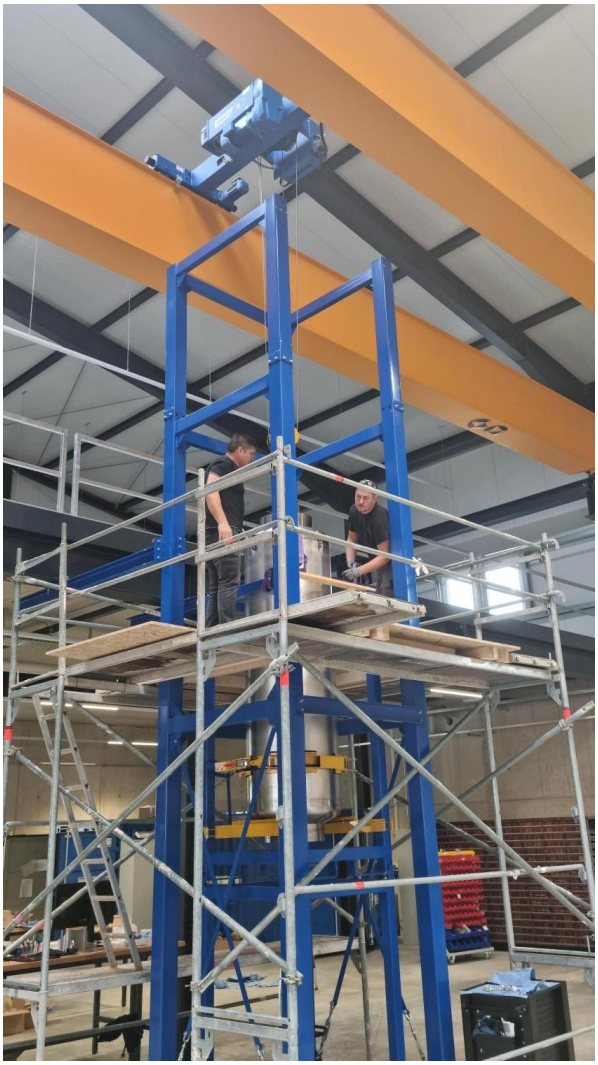


Abbildung 19 CcH2-Montageturm, Vakuumtank in Endmontageposition

Isolierung und Transport von Hochdruckbehältern

Die Systemintegration begann mit dem Einbau einer mehrschichtigen Isolierung (MLI), die den Strahlungswärmeaustausch zwischen dem Vakuumbehälter (mit Umgebungstemperatur) und dem inneren kryogenen Druckbehälter minimieren soll. Die Art, Form und Konfiguration der Isolierung wurde in Zusammenarbeit mit einem europäischen Marktführer im Bereich der Vakuumisolierung entwickelt, um eine korrekte Passform und Leistung zu gewährleisten. Die Installation erfolgte mit einem speziell modifizierten Tankwagen, der eine axiale Drehung des Tanks während des Isolierungsprozesses ermöglichte. Die MLI-Platten wurden mit einem speziellen vakuumkompatiblen und wärmereflektierenden Klebeband verbunden und zusätzlich mit glasfaserverstärkten Schweißschutzschichten an den Stellen versehen, an denen die Vakuumhülle in den letzten Montageschritten geschweißt werden sollte. Dadurch wurde sichergestellt, dass die empfindliche MLI nicht beeinträchtigt wird und ihre Funktionalität verliert.

Abbildung 20 Hochdruck-Kryogen-Wasserstofftank mit MLI

Nach dem Anbringen der Isolierung konnte der Tank nur noch an seinen Endstutzen angefasst werden, wobei der Kontakt mit der Isolierung vermieden werden musste, um Beschädigungen zu vermeiden. Es wurden spezielle Montagevorrichtungen entwickelt und im Auftrag gefertigt, um das Anheben und den Transport des Tanks sowie dessen Drehung in die vertikale Position zu ermöglichen. Nach der Drehung des Hochdruckbehälters würde dieser mit dem Hebekreuz als Schnittstelle und Führungselement in den CcH2-Systemmontageturm integriert werden.

Abbildung 21 Hochdruck-Kryogen-Wasserstofftank in Rotationseinheit

Integration von Vakuumbehälter und Druckbehälter

Die Integration des Druckbehälters in die Vakuumhülle erfolgte unter Verwendung des Montageturms als primäre Führungs- und Sicherheitsstruktur für den Prozess. Es wurden verstellbare Plattformen konstruiert und hergestellt, um die korrekte Ausrichtung der Vakuumhülle innerhalb des Turms zu ermöglichen. Nach Abschluss der Ausrichtung (sowohl axial als auch winkelmäßig) wurde der Druckbehälter kontrolliert in die Vakuumhülle abgesenkt, wobei der Kontakt zwischen der mehrschichtigen Isolierung und der Vakuumhülle auf ein Minimum beschränkt wurde, um ein Reißen der Platten zu verhindern. Sobald die richtige Tiefe erreicht war, wurde der Druckbehälter mit Hilfe eines Krans arretiert, der mit einem Hydraulikzylinder gekoppelt war, um sein Gewicht zu tragen und als Sicherheitsmechanismus für die unterhalb der Baugruppe arbeitenden Mitarbeiter zu dienen. Die beiden Behälter wurden mit einem speziell entwickelten Stützlager auf Glasfaserbasis fest miteinander verbunden, wodurch die Baugruppentiefe endgültig festgelegt wurde. Anschließend wurde der Prozess auf die Oberseite der Baugruppe verlagert, wo die Gasleitungen und Sensoren vor der Montage der Vakuumbehälterkuppel und des oberen Lagers installiert wurden.

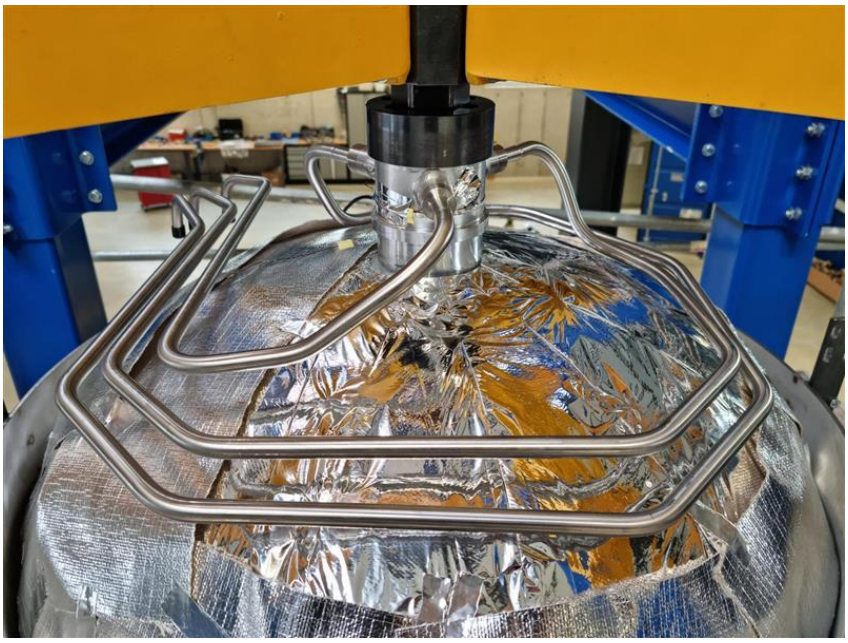


Abbildung 22 Gasleitungen nach dem Schweißen an Bimetallkupplungen

Vormontage des Gaspanels

Parallel zur MLI-Anwendung, der Vorbereitung und Integration von Vakuum- und Druckbehältern wurde das CcH2-Gasspeichersystem auf der Grundlage des in früheren AP-Phasen des Projekts fertiggestellten Entwurfs gebaut. Das System wurde speziell für einen solchen parallelen Bau konzipiert, um die künftige Serienfertigung mehrerer Einheiten vorzubereiten. Um diesen Prozess zu ermöglichen, wurde eine spezielle Stützkonstruktion gebaut, die die Platte mit einer der Vakuumhülle entsprechenden Krümmung hält und ihren Transport mit einer speziell angefertigten Handhabungseinheit ermöglicht (wobei die Krümmung beibehalten wird, um eine Belastung der Schweißnähte und Anschlüsse des Gassystems zu vermeiden). Nachdem die meisten Gaskomponenten an der Gasplatte befestigt worden waren, konnte die endgültige Systemintegration erfolgen.

Abbildung 23 Gas-Panel-Vormontage

Vollständige Systemintegration

Nach Abschluss der Integration der Behälter und der Vormontage des Gaspanels konnten die endgültigen Integrationsarbeiten beginnen. Die Vakuumhülle (mit dem Hochdruckbehälter) wurde in die horizontale Position gedreht und auf einen Befestigungstisch gestellt, wo sie mit Hilfe geeigneter Handhabungsgeräte mit dem Gaspanel ausgestattet wurde. Nachdem das Gaspanel ausgerichtet und in seiner endgültigen Position befestigt worden war, wurden die beiden Einheiten miteinander verbunden. Die sekundäre Vakuumhülle, in der sich das Tankventil befindet, wurde anschließend durch Verschweißen mit dem Gaspanel fertiggestellt und stellt die endgültige Verbindung zwischen den beiden Einheiten her. Die Montage wurde durch die Integration der Füllleitung (und der sie umgebenden Vakuumleitung) sowie die endgültige Positionierung des externen Wärmetauschers und des TPRD abgeschlossen.

Abbildung 24 Gaspanel nach Integration mit dem Vakuumtank

2.6. Arbeitspaket 5- Absicherung

AP5.1 Ableitung Absicherungszyklus / Prüfmittelentwicklung

Das Arbeitspaket 5 umfasste die Test- und Validierungsaktivitäten für Komponenten und Systeme, die im Rahmen des CryoTRUCK-Projekts entwickelt wurden. Während der Projektlaufzeit wurden

zahlreiche Aktivitäten durchgeführt, angefangen bei der Modellierung, Konstruktion, Bewertung und Prüfung, die sowohl intern als auch durch externe Partner durchgeführt wurden. Viele Komponenten wurden neu entworfen und gebaut, insbesondere um den Anforderungen der CcH2-Systeme gerecht zu werden, darunter Druckbehälter, Ventile, Wärmetauscher, Betankungskomponenten, Kupplungen, Vakuumbaugruppen und andere. Die Projektentwicklung gipfelte in einer funktionalen Validierung auf Systemebene, bei der der komplette CcH2-Speichersystem-Demonstrator in den Räumlichkeiten der Firma Cryomotive einer kryogenen Druckprüfung unterzogen wurde.

Im Rahmen des Projekts wurden im Arbeitspaket 5.1 erhebliche Anstrengungen unternommen, um Konzepte, Methoden und Verfahren für die Validierung verschiedener Komponenten und Systeme zu entwickeln, die im Laufe des Projekts hergestellt wurden. Da die CcH2-Technologie sowohl die Kryotechnik als auch die Hochdrucktechnik miteinander verbindet, mussten Methoden evaluiert werden, die beiden Anforderungen gerecht werden, insbesondere für sicherheitskritische Komponenten wie Druckbehälter, Ventile, Anschlüsse, Kupplungen, Sicherheitsvorrichtungen und Betankungsausrüstung. Mit zunehmendem Integrationsgrad (Stufe 0 bis 5) haben die Komplexität und der Umfang der Tests zugenommen, während gleichzeitig das Marktangebot und die Gesamterfahrung innerhalb der Ingenieursgemeinschaft begrenzt waren (da in Europa bisher nur eine CcH2-Systemvalidierungskampagne für BMW durchgeführt wurde). Soweit möglich, basierten die Validierungsaktivitäten auf bestehenden international anerkannten Vorschriften und den Erfahrungen der Cryomotive-Mitarbeiter im Bereich der Kryotechnik und Hochdrucktechnik. Außerdem wurden im Laufe des Projekts neue Methoden entwickelt, um die Akzeptanz des vorgeschlagenen Designs wichtiger Systemkomponenten wie Wärmetauscher und Verbindungen aus unterschiedlichen Materialien zu unterstützen. Zu den Ergebnissen gehörten die Entwicklung interner Prüfstände im Cryomotive-Technologiezentrum für Hochdruckgas- und Hydraulikprüfungen von Komponenten. Durch den Aufbau von internen Prüfkapazitäten und Prüfständen konnten selbstständig Prüfungen durchgeführt werden. Dazu wurden 2 Teststände bei der Cryomotive aufgebaut.

Im Projektverlauf wurde erkennbar, dass eine erweiterte Unterstützung der IABG bei der Entwicklung des CcH2-Prüfzentrums in Lichtenau und des Hydraulikprüfzentrums in Dresden notwendig war. Dies betraf die Auslegung der Sicherheitsarchitektur, sowie die Berücksichtigung der CcH2-spezifischen Anforderungen und Herausforderungen. Im Ergebnis wurde ein nicht unwesentlicher Beitrag zum Design und zur Auslegung der Prüfanlagen bereitgestellt.

AP5.2 Abblase- und Sicherheitsventile, TPRD, Blow-off- Ventil

Das im CcH2-Speichersystem installierte TPRD war ein handelsübliches Produkt, das nach den einschlägigen Normen zertifiziert war, jedoch wurden die Überdruckschutzventile von einem externen Lieferanten in Zusammenarbeit mit Cryomotive speziell entwickelt. Während der Entwicklung der Produkte spezifizierte Cryomotive die Ventilschnittstellen für die Anbindung an das Testsystem und ermöglichte so deren sichere Integration in das zukünftige Fahrzeugsystem. Das Abblaseventil und die Druckbegrenzungsventile wurden auf der Grundlage der verfügbaren Hochdruck-Sicherheitstechnologie des Cryomotive-Partnerunternehmens entwickelt und ihre Konstruktion für den Betrieb unter kryogenen Temperaturen angepasst. Die Ventile wurden einer Hochdruck-Kryogenqualifizierung beim Hersteller unterzogen, um ihre korrekte Aktivierung sicherzustellen und die Veränderungen der Entlüftungsdrücke bei verschiedenen Temperaturen zu verstehen, da die Ventile Federn zur Steuerung des Entlüftungsdrucks verwenden. Cryomotive hat die Testreihen durch die Definition der Testparameter und

die Auswertung der Testergebnisse unterstützt. Nach den Tests wurden die Hochdruck-Überdruckventile als CE-konforme Schutzvorrichtungen an Cryomotive geliefert.

AP5.3 Wärmetauscher

Der im Rahmen des Projekts entwickelte Prototyp eines externen Wärmetauschers wurde im Rahmen der CryoTRUCK-Meilenstein-Tests geprüft. Der Wärmetauscher wurde an ein Kühlmittelkreislaufsystem angeschlossen, das von einer Pumpe angetrieben wird, die der Konfiguration des LKWs entspricht, und das mit dem geeigneten Kühlmittel betrieben wird. Während der Meilensteinprüfung wurde die ordnungsgemäße Funktion des Wärmetauschers nachgewiesen, indem das aus dem Behälter stammende kryogene Gas durch den externen Wärmetauscher erwärmt wurde, wodurch die ordnungsgemäße Funktion der konstruierten Einheit bestätigt wurde.

Der interne Wärmetauscher wurde aufgrund seiner Bedeutung für die Sicherheit des Systems parallel zu Hochdruck-Wasserstoffspeichern (Stufe 2) einer zerstörenden hydraulischen Prüfung unterzogen. Zwei Testgeräte wurden vom Unternehmen hergestellt und montiert und nach der Schweißung durch einen externen Lieferanten in Prototyp-Wasserstoffspeicherbehälter integriert, die für Berst- und Zyklustests verwendet wurden, mit dem Ziel, die Lebensdauer des Behälters während beider Tests zu übertreffen, um eine angemessene konservative Auslegung nachzuweisen. In beiden Tests wurden die Wärmetauscherrohre drucklos gelassen, um die Belastungsintensität zu erhöhen, und während der statischen und zyklischen Tests mit einem externen Drucksensor auf Undichtigkeiten überwacht. Während der zerstörenden Behältertests wurden keine Leckagen in den IHEX-Kanälen festgestellt, was die angemessene statische Festigkeit und zyklische Beständigkeit der vorgeschlagenen Wärmetauscherkonstruktion bestätigt, bei der der interne Wärmetauscher die statische Festigkeit von 1139 bar (bei Kompression) und 4185 externe Druckzyklen von 450 bis 15 bar übertroffen hat.

Der äußere Wärmetauscher (oHex) wurde durch Cryomotive entworfen, simuliert und ausgelegt. Die Realisierung erster Prototypen fand in einer Abstimmung mit dem Lieferanten statt. Aufgrund der Verwendung von marktüblichen und vor-zertifizierten Bauteilen wurde kein experimenteller Nachweis zu Stabilität oder Lebensdauer des äußeren Wärmetauschers notwendig.

AP5.4 Kaltventil

Aufgrund der sicherheitskritischen Funktion des Tankventils (intern als „Kaltventil“ bezeichnet) wurde dessen Entwicklung in Zusammenarbeit mit einem marktführenden Anbieter von Kryogenventilen durchgeführt. Während des Projekts hat Cryomotive den ausgewählten Partner bei der Spezifikation und Konstruktion des Ventils tatkräftig unterstützt, indem es die erforderlichen mechanischen Konfigurations-, Funktionsdesign- und mechanischen Schnittstellenanforderungen bereitstellte und die erforderliche Testmatrix als Teil von AP 5.1 festlegte. Die Ventilprototypen wurden anschließend Hochdruck-Integritätstests, Dichtheits- und Funktionstests beim Lieferanten unterzogen, bevor sie im Rahmen der Meilenstein-Tests des CryoTRUCK-Projekts dem kryogenen Betrieb ausgesetzt wurden. Die Testparameter wurden aus bestehenden Normen und Standards abgeleitet und mit dem Lieferanten abgestimmt. Zusätzlich zu einer 675-bar-Prüfung mit Stickstoffgas wurden Vakuumleckprüfungen durchgeführt, die eine Leckrate von nicht mehr als 3x10-3 mbar*l/s nachwiesen, sowie Funktionsprüfungen unter 450 bar. Während der Installation und der Testkampagne von Cryomotive wurden zahlreiche Verbesserungen in Bezug auf Bedienbarkeit, Schnittstellen und Montagetechniken identifiziert und dem Hersteller vorgelegt, um die Produktreife zu erhöhen und die Verwendbarkeit der Ventile für spätere Anwendungen zu verbessern.

AP5.5 Tankkupplung und Betankungsstrang

Die CcH2-Speichertechnologie zeichnet sich durch zahlreiche Vorteile gegenüber derzeit auf dem Markt erhältlichen Lösungen aus. Einer davon ist die Möglichkeit des schnellen Betankens, die durch die hohe Wasserstoffdichte und die Leistung der für diese Anwendung entwickelten Kryopumpen ermöglicht wird. Um eine sichere, kontinuierliche Betankung mit hohem Durchfluss zu ermöglichen, hat ein Partnerunternehmen in Zusammenarbeit mit Cryomotive eine neuartige Betankungsvorrichtung entwickelt, die aus einem kryogenen Hochdruckschlauch, einer Kupplung und eines tankseitig verbauten Tankstutzens besteht. Die im Rahmen des Projekts entwickelten Produkte zeichnen sich durch Vakuumisolierung, sichere, leckagefreie Hochdruck-Wasserstoffanschlüsse sowie eine vollständige Isolierung der kalten Elemente vom Bediener und der Umgebung aus, um Verunreinigungen und Luftverflüssigung auf kalten Oberflächen zu vermeiden. Der Prototyp der Düse und der Aufnahme wurde in das Cryomotive CcH2-Demonstrationssystem integriert, nachdem er zuvor externe Vorqualifizierungstests bestanden hatte. Sowohl die Düse als auch die Aufnahme haben Hochdruck-Gasdichtheitsprüfungen bei 525 bar bestanden und wurden einer kryogenen Funktionsprüfung gefolgt von einer Helium-Leckprüfung unterzogen.

Abbildung 25 CcH2-Nozzle-receptacle, angeschlossen

AP5.6 Liner (Level 0)

Die Validierung der Hochdruck-Wasserstoffspeicherzylinder begann auf der Ebene der Liner mit der Durchführung einer Linerberstprüfung für beide von Cryomotive verwendeten Produktionschargen. Zwei Liner, die für die Produktionsverfahren und die Wärmebehandlung von Liner für die Verbundstofffummantelung repräsentativ sind, wurden vom Lieferanten getestet und geborsten. Beide Tests zeigten die von Cryomotive geforderte Berstfestigkeit. Insgesamt wurden von Cryomotive 16 Liner verwendet, von denen zwei einer Berstprüfung unterzogen wurden, eine für die abschließende Projektmeilensteinprüfung verwendet wurde und die anderen 13 für zerstörende Prüfungen während statischer und zyklischer Tests verwendet wurden.

Abbildung 26 Liner nach Berstprüfung, Serie 1 (oben), Serie 2 (unten)

AP5.7 Kryogener Drucktank (Level 1)

Die Entwicklung des kryogenen Wasserstoffspeichertanks der Stufe 1 begann zunächst mit einer Nasswickeltechnik, bei der Kohlefaser in Rohform in einem auf der Wickelmaschine installierten Harzbad mit Harz imprägniert wurde. Im Laufe des Projekts gelang Cryomotive unter maßgeblicher Führung durch die TUM der Übergang zu einer fortschrittlicheren Behälterfertigungstechnik, bei der die Wicklung mit vorimprägnierten Fasern, sogenannten Tow-Pregs, durchgeführt wurde, wofür die Konfiguration der Wickelmaschine geändert wurde. Dadurch konnte der Produktionsprozess verkürzt und besser kontrollierbar gemacht werden. Während der Produktion wurden die Behälter je nach Verfügbarkeit der Einrichtungen entweder einer Berst- oder einer zyklischen Prüfung in den Prüfeinrichtungen der IABG unterzogen (bei Bedarf wurden auch andere Prüfzentren in Deutschland genutzt). Cryomotive hat die Prüfverfahren im Zusammenspiel mit geeigneter Messtechnik entwickelt, um die lokale Dehnung der Kohlefaserumwicklung sowie die makroskopische Behälterverformung während der Druckbeaufschlagung (Längen- und Umfangszunahme) zu messen, die wichtige Daten für die Konstruktion der MLI-Umwicklung, der Vakuumhülle und der Behälterstützlager waren. Die ersten Behältertests konzentrierten sich auf Stufe 1, bei der die Qualität der Umhüllung und die Leistung der Auskleidung in Berst- und Zyklustests bewertet wurden. Mit zunehmender Ausgereiftheit der Behälterendverschlusskonstruktionen und der Umstellung der Wickeltechnologie wurden Tests der Stufe 2 durchgeführt.

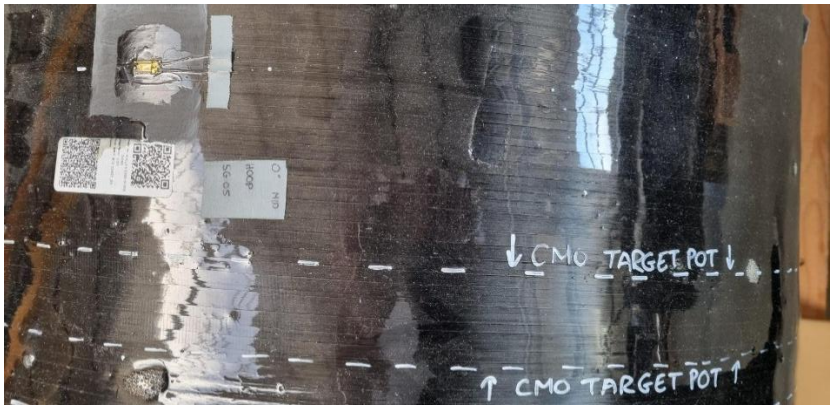


Abbildung 27 Kryogener Druckbehälter mit Dehnungsmessstreifen und Position für Umfangsmesslinie

AP5.8 Kryogener Druckbehälter (Level 2)

Cryomotive hat die Entwicklung der Tanks auf Stufe 2 beschleunigt, um die Produktreife zu erhöhen und gleichzeitig die Qualifizierung des Designs der Tankendverschlüsse und der Schweißverfahren in Originalgröße durchzuführen. Nach der Fertigstellung des Behälterdesigns und der Gewinnung von Erkenntnissen über sein makroskopisches Verhalten hat sich der Schwerpunkt auf das Design der Tankverschlussstopfen verlagert, die die mechanischen und gastechnischen Schnittstellen des internen Wärmetauschers sowie die Haupttankrohrschnittstelle beherbergen sollen. Die Endverschlüsse wurden unter Verwendung geeigneter Materialien und mit den erforderlichen Gasanschlüssen entsprechend der geforderten Funktionalität konstruiert. Zunächst wurden im Rahmen des Projekts Maßstabsversuche an den Schweißmodellkomponenten durchgeführt, um die geeignete statische und zyklische Festigkeit der Verbindung sicherzustellen. Die getesteten Proben zeigten eine hervorragende Leistung und versagten nicht unter statischen Drücken von über 3000 bar und hielten 50.000 Druckzyklen bis zu 500 bar stand, was die Anforderungen an die von Cryomotive hergestellten Druckbehälter bei weitem übertrifft.

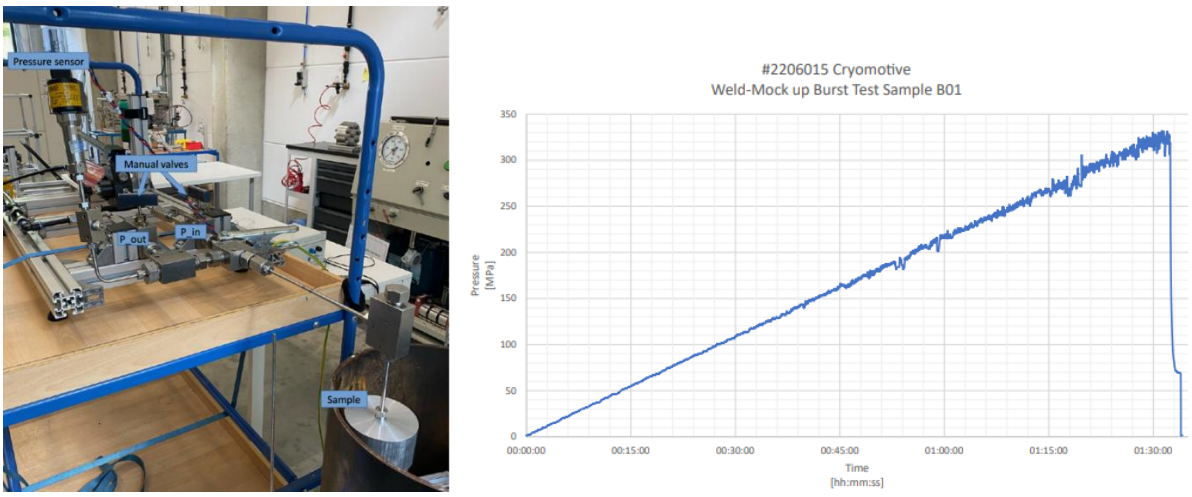


Abbildung 28 Elektronenstrahlschweißversuch Bersttest, Versuchsaufbau (links), Druckkurve (rechts)

Um den Gasanschluss an die Wasserstoff-Einfüll-/Entnahmeleitung und die IHEX-Ein- und Ausgangsleitungen zu erleichtern, mussten im Rahmen des Projekts spezielle Verbindungsbaugruppen entwickelt werden. Da die Hochdruckgasinstallation aus Edelstahlrohren (Industriestandard) besteht und die Behälterendverschlüsse aus Aluminium gefertigt sind, mussten neuartige Verbindungstechnologien

entwickelt werden, um eine direkte Verbindung der Rohrleitungen mit dem Behälter zu ermöglichen. Da ein direktes Verschweißen von Stahl und Aluminium aufgrund der sehr unterschiedlichen Schmelztemperaturen der Materialien und der begrenzten Verbindungsmöglichkeiten nicht möglich ist, wurden für diese Anwendung explosionsgeschweißte Verbindungen gewählt, da dies neben dem Reibschweißen die einzige verfügbare und vielversprechende Technologie ist, um eine solche Materialintegration durchzuführen. Cryomotive entwarf die Materialübergangsverbindungen und beschaffte nach der Durchführung von Modellierungsaktivitäten und einer FEA-basierten Validierung geeignete Materialrohlinge für die Herstellung der Bimetallverbindungen. Die in Frage kommenden Komponenten wurden anschließend einer hydraulischen Prüfung in Originalgröße unterzogen, um ihre geeignete Berst- und Zyklusleistung sicherzustellen. Während der Prüfung zeigten die Verbindungen eine Berstfestigkeit bei Drücken von bis zu 1800 bar und bestanden 22.000 Druckzyklen mit einem Maximaldruck von 450 bar, wodurch sie als geeignete Kandidaten für die zukünftige Anwendung in CcH2-Speichersystemen zugelassen wurden.

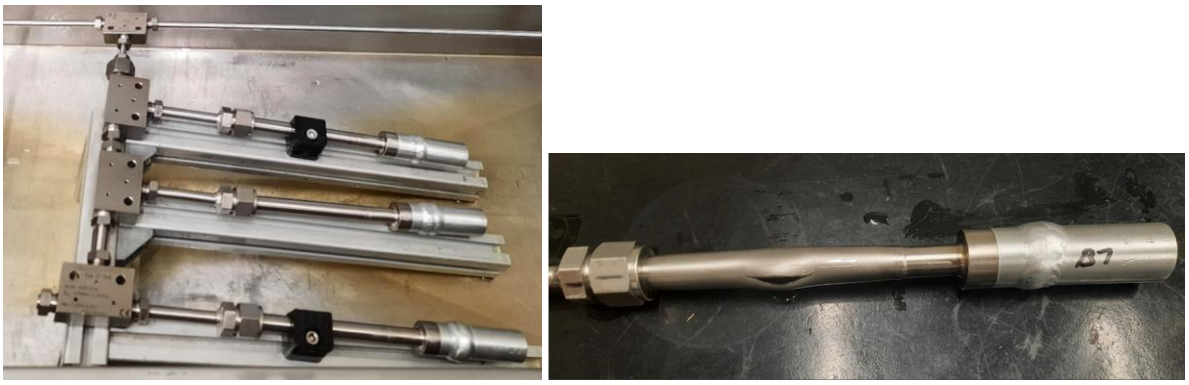


Abbildung 29 Stahl-Aluminium-Materialkupplungen unter zyklischer Prüfung (links), nach einer Berstprüfung (rechts)

AP5.9 CcH2-Speichersystem-Demonstrator, Level 3–5

Die Validierungsaktivitäten für die Level 3 und 4 wurden aufgrund von Änderungen im Projektzeitplan und der Nichtverfügbarkeit des Teststandorts in Lichtenau zusammengelegt. Um die Validierung des Demonstrationssystems durchzuführen, beschloss Cryomotive, eine eigene Testinfrastruktur in Pfeffenhausen zu entwickeln, wo kryogene Funktionstests des CcH2-Speichersystems, der Betankungsausrüstung und der CcH2-Zapfsäule durchgeführt werden konnten. Die Funktion der Vakuumwärmedämmung, der Gasaufbereitungs- und -fördersysteme sowie der Tanksteuerungen würde parallel getestet werden. Im Rahmen der Aktivitäten wurden zahlreiche Zusatzgeräte wie Wärmetauscher, LKW-Kühlmittelbad, LN2-Versorgungssystem, Gasentlüftungssysteme und Testbehälter entwickelt, um die Bewertung des gesamten Systembetriebs zu ermöglichen. Die Anlagenplanung, die Testverfahren und die Risikobewertungen wurden im Rahmen der Aktivitäten von AP 5.1 durchgeführt und ermöglichten dem Cryomotive-Team die sichere und erfolgreiche Erprobung des ersten CcH2-Speichersystem-Demonstrators.

Abbildung 30 CcH2-Demonstrationssystem-Testinfrastruktur, Cryomotive, Pfeffenhausen

Die Konfiguration des Demonstrationssystems entsprach der Konfiguration eines Wasserstoffspeichersystems in einem Lkw und umfasste alle relevanten Ventile, Sensoren und die eigentliche Tanksteuereinheit, die im Rahmen des CryoTRUCK-Projekts entwickelt wurde. Das System wurde unter Verwendung repräsentativer Lkw-Befestigungsschnittstellen auf einem Transportwagen montiert. Außerdem wurde ein Kühlmittelkreislauf mit der eigentlichen Kühlmittelumwälzpumpe des Lkw installiert, der aus einem Kühlmittelbehälter gespeist wird, der mit einer intern montierten Heizung temperiert wird.

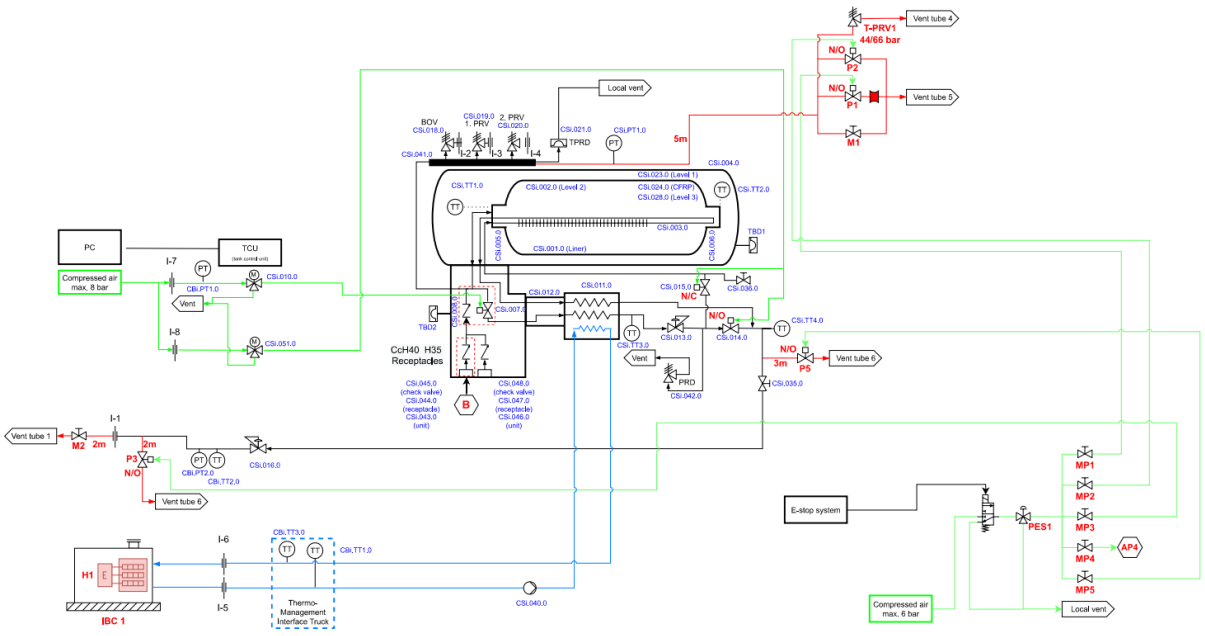


Abbildung 31 Konfiguration des CcH2-Technologiedemonstratorsystems

Die Validierungsaktivitäten begannen mit einer Druckprüfung, um sicherzustellen, dass das gesamte System korrekt montiert ist, sicherheitsrelevante Systeme und Funktionen ordnungsgemäß arbeiten und das System dicht ist. Es wurde eine stufenweise Druckbeaufschlagung mit Stickstoffgas auf einen Zieldruck von 60 bar durchgeführt, wobei gleichzeitig die Druckstabilität und die Sensorik über die Tanksteuereinheit (TCU) überwacht wurden. Die Druckhaltung des Systems wurde sichergestellt, sodass das Testprogramm fortgesetzt werden konnte.

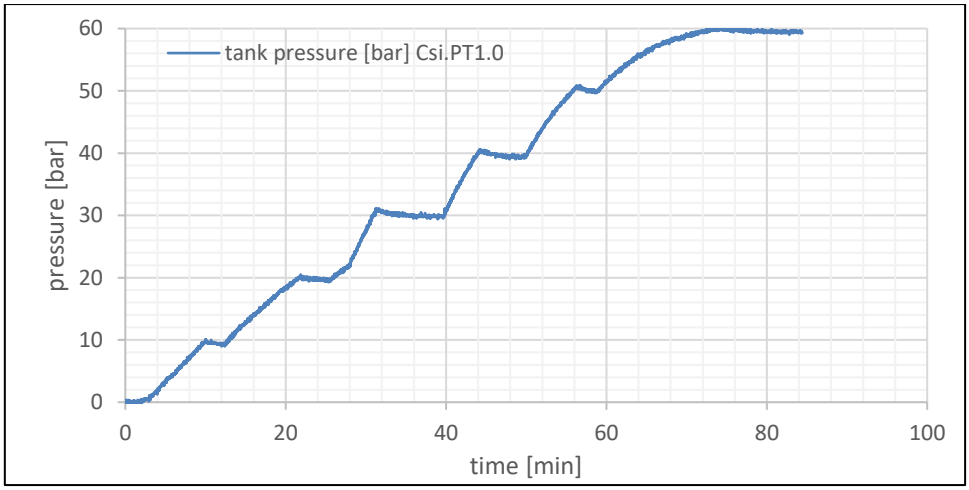


Abbildung 32 Prüfdruck-Testdruckverlauf

Nach der Druckprüfung wurde eine Funktionsprüfung durchgeführt, um die korrekte Funktion des Tankventils und der Durchflussregelventile sicherzustellen und deren Funktionalität und Steuerbarkeit zu bestätigen. Die Ventile des CcH2-Systems wurden über pneumatische Versorgungsventile ausgelöst, die von der TCU gesteuert werden, um sicherzustellen, dass der Tank kontrolliert entleert werden kann und dass das interne Wärmetauscher-Steuersystem ordnungsgemäß funktioniert. Der Gasfluss durch den internen Wärmetauscher wurde durch Beobachtung der Temperaturänderung der Tankauskleidung bei Betrieb des Wärmetauschers bestätigt.

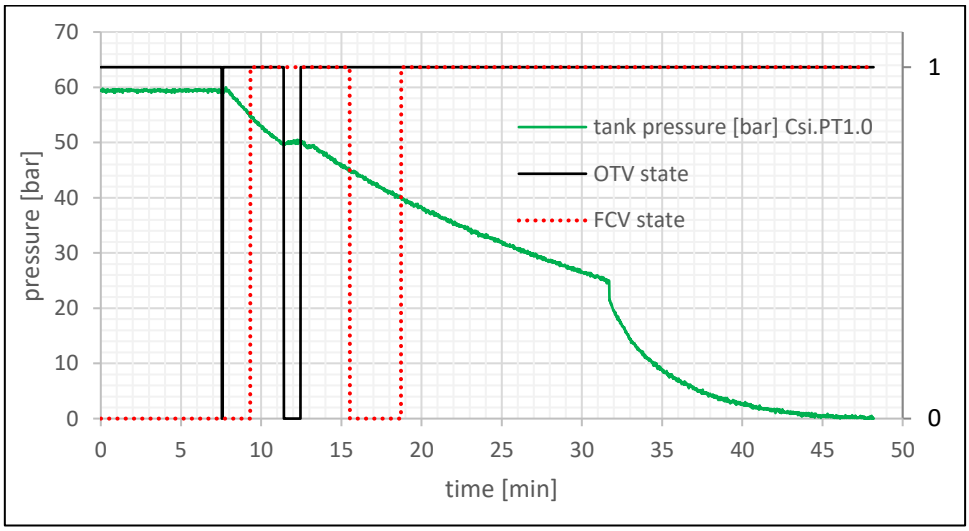


Abbildung 33 Funktionsprüfung Druck- und Ventilzustandsdaten

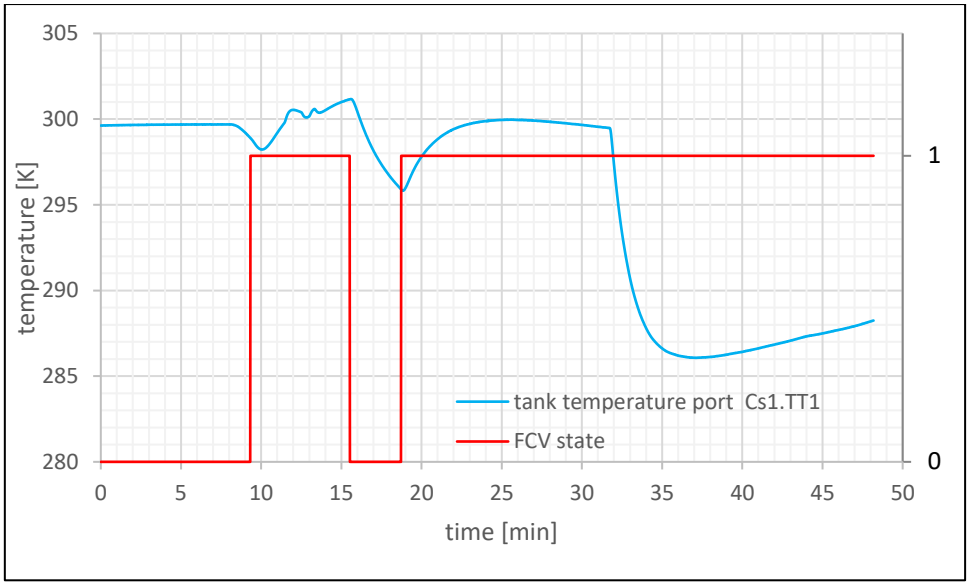


Abbildung 34 Funktionstest Tank-Temperatur vs. Position des Durchflussregelventils (1-Umleitung des Durchflusses über internen Wärmetauscher, 0-direkte Entlüftung)

Nach Abschluss der Funktionsprüfung des CcH2-Systems und der Entlüftung von Stickstoff wurde das System mit einem Gemisch aus 5 % Wasserstoff und Stickstoff unter Druck gesetzt, um eine Wasserstoffgas-Dichtheitsprüfung durchzuführen. Das System wurde auf 10 bar unter Druck gesetzt, und jeder Gasanschluss des Gasaufbereitungs- und -verteilungssystems wurde mit einem Wasserstoffdetektionsgerät geprüft. Während im Gasverteilungssystem außerhalb des sekundären Vakuumraums keine Lecks festgestellt wurden, hat der Wasserstoffsensor Gas im sekundären Vakuumraum angezeigt, was auf ein mögliches Leck an den geschweißten Rohrverbindungen hindeutet. Die tatsächliche Leckstelle konnte nicht identifiziert werden, da alle zugänglichen Schweißnähte analysiert wurden und die Leckstelle außerhalb des zugänglichen Bereichs liegen dürfte. Auf Grundlage dieser Rückmeldung wurden das Systemdesign und der Montageprozess für zukünftige Systemgenerationen verbessert. Darüber hinaus wurde die Verwendung mechanischer Rohrverbindungen (Fittings) in Vakuumgehäusen für die Zukunft ausgeschlossen.

Die Kryogenprüfung wurde mit unterkühltem flüssigem Stickstoff durchgeführt, der aus einem vor Ort befindlichen, auf etwa 33 bar unter Druck stehenden Flüssigstickstofftank zugeführt wurde. Das Prüfsystem wurde so konzipiert, dass es über die Zapfsäule mit Kryogengas versorgt wird, um die Funktionsweise des gesamten CcH2-Betankungssystems einschließlich der Zapfsäulenventile, der Düsensteuerventile und des Wasserstoffspeichersystems zu demonstrieren. Während der Tests wurde eine schnelle Abkühlungsreaktion des Speicherbehälters beobachtet, was auf eine geeignete Auswahl und Positionierung der Temperatursensoren für die zukünftige Anwendung bei der Bestimmung und Überwachung des Tankfüllstands hinweist. Während der Tests wurde eine Minimaltemperatur von -133 °C gemessen.

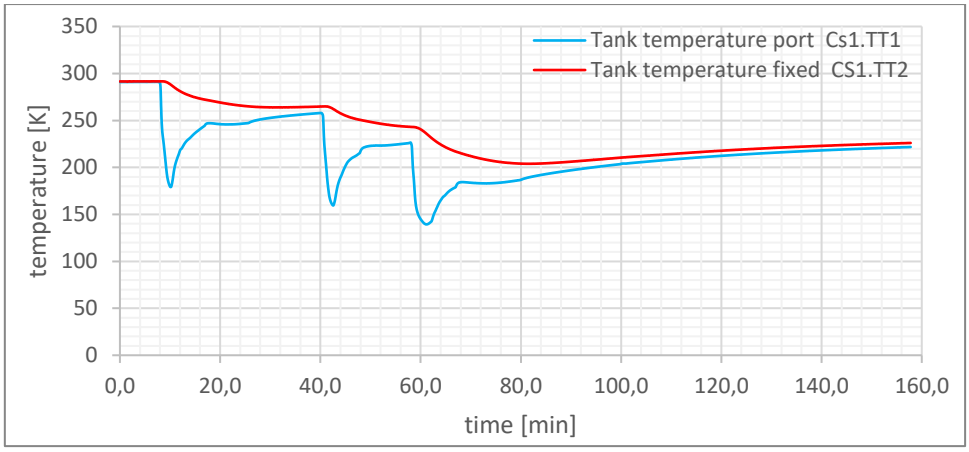


Abbildung 35 Kühlleistung des Tanks während der Befüllung des Kryogensystems

Die Daten aus den Kryokühlungstests wurden auch zur Validierung des im Rahmen des CryoTRUCK-Projekts entwickelten thermischen Tankmodells verwendet. Es wurde eine gute Übereinstimmung bei der Vorhersage der Druckentwicklung im Tank festgestellt. Die Temperaturmessungen auf der Füllseite wichen vom Modell ab, was auf den bei der Modellkonstruktion verwendeten Modellierungsansatz zurückzuführen ist, bei dem die globale, gemittelte Temperatur des Gases und der Auskleidung mit den lokal gemessenen Temperaturen an den Tankenden verglichen wurde. Nach der Stabilisierung wurde die erwartete Konvergenz zwischen den Sensoranzeigen und den vorhergesagten Temperaturen festgestellt.

Die kryogene Funktionsprüfung wurde durch kontrollierte Tankentlüftung unter Verwendung des Kälteventils bei gleichzeitigem Betrieb des internen Wärmetauschers durch Betätigung der Durchflussregelventile durchgeführt. Dies ermöglichte die Überprüfung der Leistung des externen Wärmetauschers und die ordnungsgemäße Konditionierung des Abgases, was durch den Gasauslasstemperatursensor bestätigt wurde. Während der kryogenen Gasentnahme aus dem Tank wurde eine Wärmeabfuhr aus dem Kühlmittel beobachtet, was den korrekten Betrieb des Wärmetauschers bestätigt.

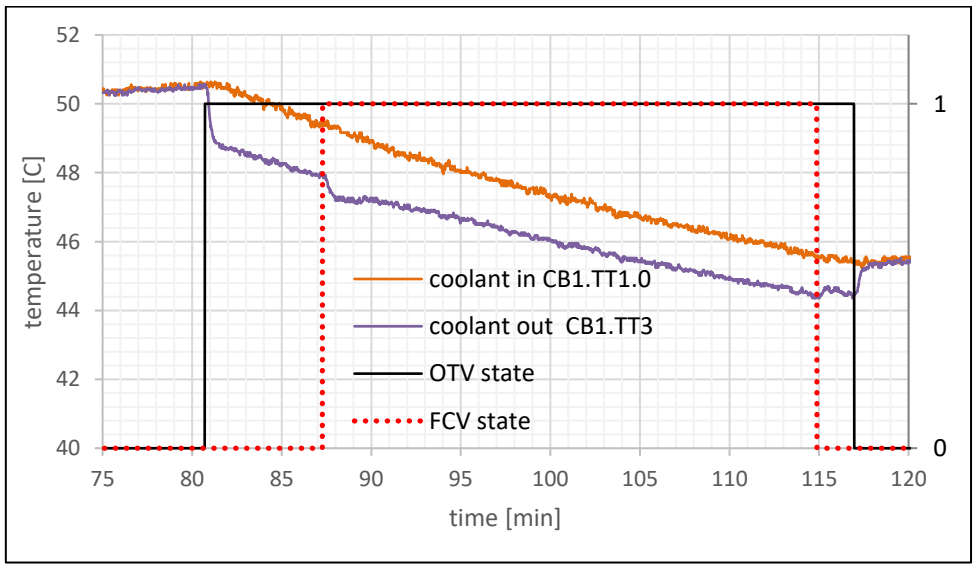


Abbildung 36 Kühlmitteltemperatur während der Kryogenprüfung

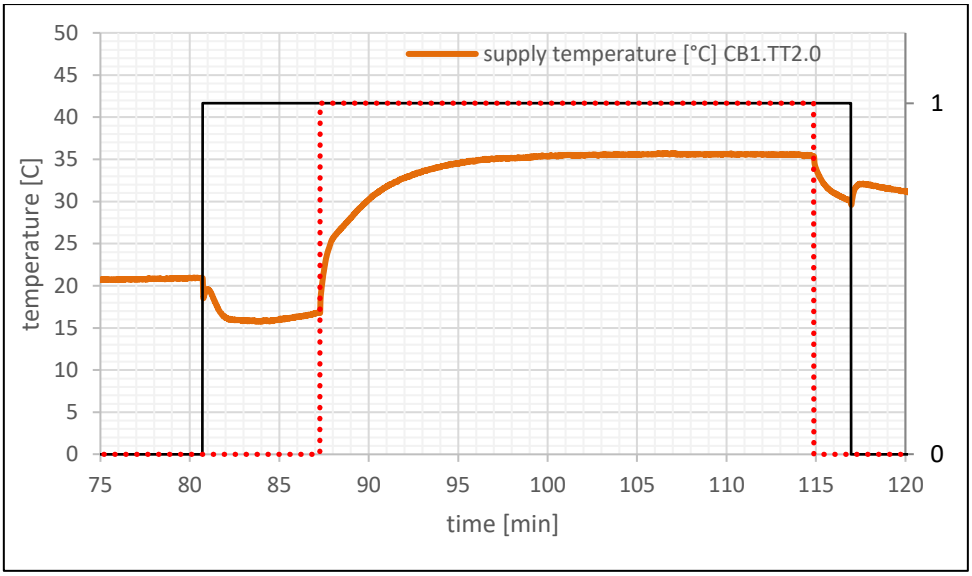


Abbildung 37 Messwert des Kraftstoffzufuhrsensors während einer simulierten Gasentnahme bei Betrieb des internen Wärmetauschers (rote Kurve, 1-IHEX in Betrieb), Position des Tankventils (schwarze Kurve, 1-offen, 0-geschlossen)

Die Kryogenprüfung des CcH2-Systemdemonstrators in den Räumlichkeiten der Firma Cryomotive in Pfeffenhausen wurde erfolgreich abgeschlossen und hat gezeigt, dass die Technologie für die weitere Entwicklung hin zu einem Einsatz als Wasserstoffspeichersystem in Fahrzeugen bereit ist. Die Fähigkeit des Systems, kryogenes Gas sicher zu speichern, zu verarbeiten und zu konditionieren, sowie die ordnungsgemäße Funktion der Betankungsanlage und der Ausrüstung wurden überprüft. Während der Tests wurden zahlreiche potenzielle Verbesserungen festgestellt, die in Form von Korrekturmaßnahmen oder Designaktualisierungen für zukünftige Systeme umgesetzt wurden. Die korrekte Funktion der Tanksteuereinheit wurde während der Tests bestätigt, ebenso wie ihre Fähigkeit, als Datenerfassungssystem für die fahrzeugseitige Messung der Systemleistung zu dienen.

Insgesamt wurde ein mehrtägige Testkampagne realisiert mit einer Vielzahl von Einzelprüfungen, welche, in einigen Fällen, mehrfach durchgeführt wurden, um eine repräsentative Datenlage zu generieren.

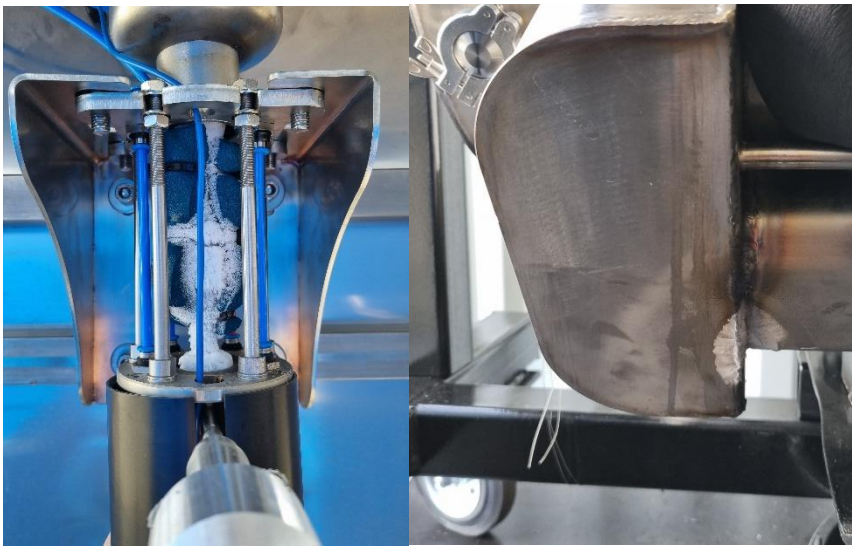


Abbildung 38 Beispielhafte Beobachtungen während der Prüfung des Kryosystems, Wärmebrücken in der Betankungsvorrichtung (links), sekundäres Vakuumsystem des CcH2-Speichers (rechts)

2.7. Arbeitspaket 6- Fahrzeugintegration in MAN Lkw Versuchsträger

Das Ziel des Arbeitspakets ist die mechanische und funktionale Integration des CcH2 Tanksystems in eine bestehende Brennstoffzellen Lkw-Antriebsarchitektur des Partners MAN. Dazu hat Cryomotive in den Arbeitspaketen 6.1, 6.2 und 6.4 unterstützt.

AP6.1 Fahrzeugentwicklung - Konstruktion

Nachdem der Fahrzeugbauraum zur Integration des CcH2-Speichersystems bereits im AP1 festgelegt wurde, sind in diesem AP Detailabstimmungen zum Einbau am Fahrzeug durchgeführt worden. Dies betraf die mechanische und elektrische Integration, sowie die Betrachtung der Massenbilanz. Gemeinsam mit MAN wurde ein Montagekonzept entwickelt.

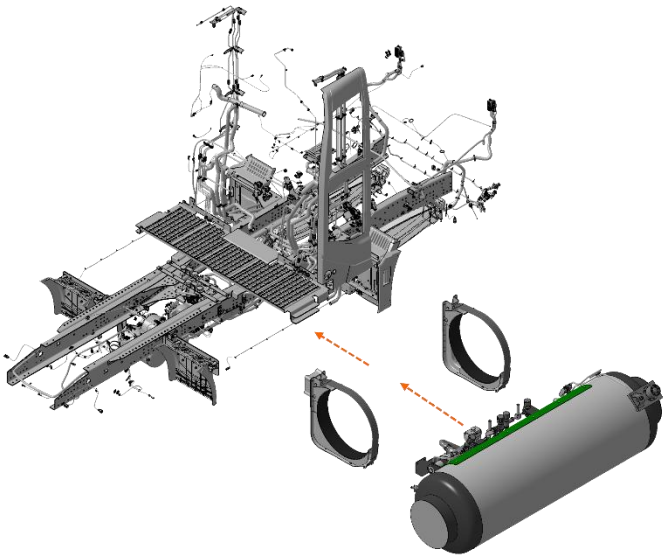


Abbildung 39 Darstellung der Montage des Speichersystems am Versuchsträger

AP6.2 Funktionsentwicklung / Integration EE / Steuerung

Die Funktionsbeschreibung für verschiede Betriebszustände des Fahrzeugs wurden in Abstimmung mit dem Partner MAN im Dokument „EE Controls Strategy v07“ zusammengefasst und freigegeben. EE Schnittstellen und Dokumentation wurden mit MAN geteilt und mit der Realisierung für ein 1-Tank-System im Fahrzeug begonnen. Die Erkenntnisse aus AP4 und RCS (FuSi) wurden in die Entwicklung und Dokumentation eingearbeitet, konnten aber zum Projektende nicht vollständig validiert werden, da die Fahrzeugintegration nicht abgeschlossen werden konnte. Erwartbare Änderungen und Modifikationen können aufgrund des modularen Aufbaus schnell umgesetzt werden.

Zudem ist eine Softwareänderung auf Grund der gewählten Architektur schnell durchführbar. Eine Dokumentation der Fahrzeugsoftware kann nur auf Grundlage der bisher geteilten Dokumente erfolgen und erst nach Ende der Fahrzeugerprobung abgeschlossen werden, da nicht ausgeschlossen werden kann dass sich in diesem Zeitraum, aus den Betriebsbedingungen, Modifikationsbedarfe ergeben.

AP6.4 Fahrzeugentwicklung – Dokumentation, Funktionssicherheit und Homologation

Cryomotive hat MAN bei der Zulassung des Erprobungsträgers unterstützt und dazu die relevanten Unterlagen und Nachweise geliefert, sowie an einigen Besprechungen mit dem Zertifizierungsunternehmen TÜV Süd teilgenommen.

2.8. Arbeitspaket 8- Lkw Versuchsträger Erprobung MAN

Das Ziel dieses Arbeitspaketes war der Nachweis der Funktion des CcH_2 Tanksystems in einem MAN Nutzfahrzeug-Versuchsträger auf einem Erprobungsgelände. Hierzu ist eine Erprobungstankstelle, die CMO für den Erprobungsbetrieb bereitstellen und betreiben wird, geplant.. Die im weiteren beschriebenen Aktivitäten sind die im Projektzeitraum für AP 8 durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse. In den Arbeitspaketen 8.1 und 8.2 haben keine Arbeiten stattgefunden.

AP8.3 Planung / Aufstellung / Betrieb CcH2 Betankungssystem

Im Laufe des Projektes wurden verschiedene Aufstelloptionen auf dem Betriebsgelände von MAN diskutiert und geplant. Die durchgeführten Planungen sollten die MAN—interne Entscheidungsfindung ermöglichen. Aufgrund der erwarteten langen Entscheidungs- und Realisierungszeiten wurde frühzeitig mit der Layoutplanung begonnen. Aufgrund der Erfahrungen in der CcH2-Technologie wurde die Aufstellplanung durch Cryomotive realisiert, unter Berücksichtigung der von MAN definierten Rahmenbedingungen, wie Ort und Fläche. Neben der räumlichen Planungen wurden Aspekte der Genehmigungsplanung, sowie der sicherheitstechnischen Auslegung berücksichtigt. Aufgrund veränderter Randbedingungen zum Aufstellort und des erkennbaren Projektfortschritts hat die Realisierung der Tankstelle nicht stattgefunden.

Die Tankstellenkomponenten, mit Ausnahme der Betankungskomponenten (Kupplung, Druckschlauch, Tankstutzen), wurden nicht beschafft oder bereitgestellt. Die Arbeiten an der Betankungsbaugruppe wurden mit verschiedenen Testreihen beim Hersteller abgeschlossen und ein Prototyp bestehend aus Nozzle, Receptacle und Wellschlauch wurde angefertigt. Dieser wurde bei den im Projekt CryoTRUCK durchgeführten Systemtests an den durch das Projekt ColdHyFuel bereitgestellten Tankautomaten (Dispenser) verbaut. Weitere Details, siehe AP 5.5 und Kapitel 1.3.

Abbildung 40 CcH2-Betankungskupplung (Receptacle (rechts) / Nozzle mit Schlauchpaket (links))