

Simulationsmodule für die Entwicklung von Wasserstoff-Fahrzeugspeichern

HySim

Schlussbericht TU Dresden

Version	Version 2.1
Laufzeit des Vorhabens	01.09.2008 – 31.12.2011
Zuwendungsempfänger	TU Dresden
Förderkennzeichen	0327813D
Verbreitung	Öffentlich
Fälligkeitsdatum	30.06.2012
Erstellungsdatum	30.06.2012

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Förderkennzeichen: 0327813A-D

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Autoren

Dieses Dokument wurde erstellt von der TU Dresden

Beiträge wurden verfasst von

Christoph Haberstroh

Robin Langebach

Jürgen Essler

Thomas Funke

Projektkoordinator

Dr.-Ing. Markus Kampitsch

EK-34, KVA Clean Energy

BMW AG

Petuelring 130

80788 München

Tel: 176-601-37175

Mail: Markus.Kampitsch@bmw.de

© 2011 das HySim Konsortium

Inhaltsverzeichnis

I.	Kurze Darstellungen	4
I.1	Aufgabenstellung	4
I.2	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	5
I.3	Planung und Ablauf des Vorhabens	6
I.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde	7
I.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	9
II.	Eingehende Darstellungen.....	10
II.1	Verwendung der Zuwendung	10
II.2	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	20
II.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	20
II.4	Voraussichtlicher Nutzen	20
II.5	Fortschritt bei anderen Stellen	21
II.6	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen	21
	Anhang: Literaturverzeichnis	23
	Anlage: Erfolgskontrollbericht	24

I. Kurze Darstellungen

I.1 Aufgabenstellung

Die Bundesregierung hat die Notwendigkeit von Entwicklungsaktivitäten für kompakte, zuverlässige und kundenwerte Speichersysteme bei automobilen Anwendungen festgestellt. Ziel von HySim ist die Erstellung von Ingenieurwerkzeugen zur Entwicklung optimierter Wasserstoff-Speichersysteme. Im Besonderen sollen die Projektergebnisse Entwicklungsingenieure zukünftig dabei unterstützen, Volumen, Gewicht, Kosten, sowie das thermische Verhalten von automobilen Wasserstoffspeichersystemen in der Design- und Entwicklungsphase deutlich zu verbessern, um so zu einer schnelleren Marktreife der als Schlüsseltechnologie eingeschätzten Wasserstoff-Fahrzeugspeicherung zu gelangen. Der Handlungsbedarf in diesem wesentlichen Technologiefeld wird von der Bundesregierung sowohl im 5. Energieforschungsprogramm als auch im „Nationalen Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie“ formuliert.

Im Rahmen des Projekts HySim soll eine Reihe von Simulationsmethoden und Werkzeugen entwickelt bzw. basierend auf bestehenden Werkzeugen weiterentwickelt und validiert werden, die bei der Auslegung und Optimierung von Wasserstoffspeichersystemen für Kraftfahrzeuge zum Einsatz kommen sollen. Hierbei stehen vor allem solche Wasserstoffspeicher im Vordergrund, die Wasserstoff in molekularer (physikalischer) Form speichern, da nur diese Speicher derzeit einen baldigen großflächigen Einsatz in Fahrzeugen versprechen. In einem ersten Schritt sind Modelle für die im Tank auftretenden komplexen physikalischen Phänomene, die bisher noch nicht ausreichend erfasst und modelliert werden konnten, zu erstellen. Auf Grundlage des so zusätzlich nutzbaren Wissens werden Techniken entwickelt, die es Ingenieuren ermöglichen, auch ohne profunde Spezialkenntnisse in Thermodynamik und Thermo-Fluidmechanik Systemkomponenten zu simulieren und Gesamtsystemanalysen durchzuführen. Die zu entwickelnden Methoden werden Auslegung und Optimierung von Speichersystemen erleichtern und sind Grundlage für die zukünftige Serienentwicklung von Wasserstoff-speichernden Fahrzeugkomponenten.

Das HySim-Partnerkonsortium vereint fünf Partner, die als ausgewiesene wissenschaftliche und industrielle Experten für Wasserstoff, Wasserstoff-Fahrzeugspeicher sowie für verschiedene Simulationsverfahren zur anwendungsnahen Modellierung von dreidimensionalen und eindimensionalen thermischen, hydraulischen und thermo-mechanischen Transportvorgängen verfügen.

	Physikalische Effekte	Komponentenmodellierung	Systemmodellierung	Experimentelle Validierung
ANSYS				
BMW				
IMAGINE France				
IMAGINE Germany				
TU Dresden				

Die TU Dresden trägt als wissenschaftlicher Partner wesentlich zur Theoriebildung und Modellierung bisher nicht ausreichend berücksichtigter physikalischer Effekte in Wasserstoffspeichersystemen bei. Einen entscheidenden Beitrag erbringt die TUD bei der experimentellen Validierung verschiedener untersuchter physikalischer Effekte und Komponenten mit besonderen Anforderungen an transiente thermo-hydraulische Randbedingungen. Die Ergebnisse der TUD werden als Eingabedaten für die 3D- und 1D-Komponenten- und Systemmodellierung benötigt.

I.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

In Wissenschaft, Industrie und Politik herrscht Einigkeit darüber, dass sich die Ära der fossilen Brennstoffe ihrem Ende zuneigt. Aktuelle und erwartete Versorgungsprobleme aufgrund begrenzter Rohölvorräte, politischer Instabilität in verschiedenen Ölförderregionen und wachsender Nachfrage der Volkswirtschaften in den Schwellenländern stellen Volkswirte und Verbraucher gleichermaßen vor Herausforderungen. Zusätzliche Brisanz gewinnt die Debatte um den Kraftstoff der Zukunft durch die Sorgen um die Umweltverträglichkeit von Brennstoffen auf Kohlenwasserstoffbasis. Für einen Großteil der mit dem Klimawandel in Verbindung gebrachten CO₂-Emissionen zeichnet der Personen- und Gütertransport verantwortlich. Auch in Ballungsgebieten mit großer Bevölkerungsdichte bergen Kraftfahrzeugabgase (NO_x, Rußpartikel) ernsthafte Umweltgefahren. Ziel ist deshalb eine drastische Senkung der Kraftfahrzeugemissionen, die zunehmend auch in den Fokus gesellschaftlicher Diskussion und politischer Regulierung gerät.

Der Energiebedarf für industrielle wie mobile Anwendungen ließe sich nahezu vollständig mit Hilfe regenerativer Energie decken, wenn machbare und wirtschaftliche Lösungen gefunden werden, aus Sonneneinstrahlung, Wind- und Wasserkraft, Biomasse und Erdwärme gewonnene regenerative Energie in Strom zu verwandeln und diesen geeignet zu zwischen zu speichern. Durch eine Primärenergiegewinnung aus regenerativen Energiequellen ließe sich der Ausstoß von Treibhausgasen wie CO₂ nahezu vollständig vermeiden. Die Nutzung regenerativ erzeugter Energie im Kraftfahrzeug stellt eine große Herausforderung dar. Benötigt wird eine Methode, Energie im Fahrzeug effizient zu speichern und zu nutzen. Biomasse-basierte Kraftstoffe, elektrische Speicher und Wasserstoff. Jeder dieser Energiespeicher hat seine Vor- und Nachteile.

Die derzeit vielversprechendste Möglichkeit, regenerative Energie im Fahrzeug zu speichern, ist Wasserstoff. Wasserstoff ist mit vertretbarem technischen Aufwand und langfristig wirtschaftlich und in ausreichender Menge zu erzeugen. Bei seiner Umsetzung im Antriebsaggregat entsteht geruchloser Wasserdampf, in einem Verbrennungsmotor außerdem sehr geringe Mengen NO_x. Damit ist Wasserstoff der heute aussichtsreichste Kandidat für den Kraftstoff der Zukunft.

Die Speicherung im Fahrzeug stellt die aktuell größte Hürde auf dem Weg zur Mobilität mit Wasserstoff dar. Dies liegt im Wesentlichen an der bei Umgebungsbedingungen außergewöhnlich niedrigen Energiedichte des Wasserstoffs in physikalischer ungebundener Form, die sich erst bei sehr niedrigen Temperaturen oder höchsten Drücken einem für den Fahrzeugbetrieb ausreichenden Niveau annähert. Die heute gängigen oder sich in der Entwicklungsphase befindlichen Speichertypen sind:

1. Druckgasspeicher
2. Kryodruckspeicher
3. Flüssigspeicher
4. Feststoffspeicher

Ein von BMW seit 2005 verfolgter neuer Fahrzeugspeicheransatz basiert auf der Kryodruck- Speichertechnologie (CCH₂), der durch Überlegungen zur Reduzierung der Nachteile der Flüssigwasserstoff-Speicherung (H₂-Verluste durch Boil-off, komplexes Wärmemanagement) und der 700bar-Hochdruck-Speichertechnologie (niedrige Speichedichte, hoher Materialaufwand/Kosten, Hochdruck-Sicherheitsproblematik) entstanden ist. Bei der Kryodruck- Speichertechnologie wird Wasserstoff bei höchster Dichte in kaltem komprimiertem Zustand bei überkritischem Druck gespeichert. Der isolierte Innentank ist als Druckbehälter (für Drücke deutlich unterhalb 700bar, z.B. 350bar) ausgelegt. Die sich durch die niedrigeren Druckanforderungen ergebende Reduzierung des Materialaufwands ermöglicht eine leichtere und kostengünstigere Ausführung des Drucktanks. Trotz der im Vergleich zum LH₂-Speicher vereinfachten Isolation kann durch die physikalisch hohe Wärmefähigkeit des Speichermediums bei überkritischem Druck, zwischen dem minimalen und maximalen Betriebsdruck, eine deutlich erhöhte verlustfreie Standzeit gewährleistet werden, die einen verlustfreien Speicherbetrieb in typischen Nutzungsprofilen verspricht. Weitere konzeptuelle Vorteile sind in einer hohen dauerhaft verlustfreien Restmenge Wasserstoffs zu finden, die bei Erreichen des maximalen Betriebsdrucks (Abblasedruck) nach vollständiger Erwärmung im Tank verbleibt, sowie in der Möglichkeit, ausreichend hohe Drücke für alle typischen Antriebsaggregate bereitstellen zu können.

Aufgrund des sich durch Kombination verschiedener Vorteile von LH₂-und 700bar CGH₂-Speichertechnologie bei Minimierung diverser Probleme beider Speichertechniken ergebenden vielversprechenden Potentials stellte die Kryodruck-Speichertechnologie im Rahmen des HySim Projekts einen äußerst großen Anteil der Forschungsaktivitäten dar.

Die TU Dresden hat sich durch bereits vorhandene Kompetenzen auf dem Gebiet der kryogenen Wasserstofftechnologie für folgende Teilforschungsgebiete besonders qualifiziert:

1. Bereitstellung von fundierender Expertise zur Verwendung einheitlicher Stoffdaten für kryogen verwendbare Konstruktionsmaterialien und Wasserstoff als Arbeitsfluid
2. Experimentelle Validierung von numerischen Modellen zur Beschreibung der vorliegenden thermohydraulischen Effekte (Stratifikations- und Konvektionsthemen)
3. Generelle physikalische Beschreibung der Ortho-Para-Umwandlung von Wasserstoff sowie experimentelle Untersuchungen zur möglichen Vorteilsnahme im Kryodruck- Fahrzeugspeicher
4. Experimentelle Untersuchung von Isolationsvarianten für die Bereitstellung notwendiger Isolationseigenschaften am besonders gearteten und in vielerlei Hinsicht von konventionellen kryogenen Speichersystemen abweichenden Kryodruck-Fahrzeugspeicher

Die Voraussetzungen für diese besondere Qualifizierung liegen zum einen in den äußerst günstigen infrastrukturellen Voraussetzungen begründet und zum anderen an dem reichhaltigen Erfahrungsschatz im Umgang mit Kryo-Wasserstoff relevanten Fragestellungen. Im Konkreten sind folgende Voraussetzungen besonders hervorzuheben:

1. Vorhandene, TÜV zertifizierte Wasserstoffinfrastruktur mit eigenem Wasserstoffversuchsfeld, eigener Wasserstoff-Verflüssigungsanlage und einem großen Fundus benötigter Messtechnik, im speziellen anwendbar bis in den kryogenen Temperaturbereich.
2. Bereits abgeschlossene Forschungsvorhaben im Bereich der folgenden Themengebiete sind beispielsweise:
 - a. Intelligente Nutzung der Wasserstoffenthalpie, frei werdend beim Aufwärmvorgang in einem Kryowasserstoffspeicher
 - b. Intelligente Druckerzeugung zur Verwendung des kryogen gespeicherten Wasserstoffs im nachgeschalteten Verbrennungsmotor
 - c. Beschreibung der zu erwartenden thermoakustischen Oszillationen in kryogenen Wasserstoffsystemen

I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Innerhalb des Projektes HySim haben sich für die TU Dresden wesentliche Forschungsschwerpunkte herauskristallisiert, die innerhalb der antragsseitig definierten Arbeitspakete Zuordnung gefunden haben.

Im konkreten Fall waren die folgenden Arbeitspakete mit Zuordnung der finalen Mannmonatsbelegung zur Bearbeitung durch die TU Dresden (in Kooperation mit ggf. weiteren Projektpartnern) definiert.

	MM (TUD)	2008	2009	2010	2011
0000 Project Management					
0100 Coordination and Administration	2,0		x	x	x
0200 Documentation	3,0		x	x	x
0300 Dissemination exploitation	2,0		x	x	x
Sum WP	7,0				

	MM (TUD)	2008	2009	2010	2011
1000 3D Modelling (ANS)					
1100 Physical phenomena (ANS)	9,0				
1130 Natural convection and stratification (ANS)	1,0				x
1160 Para-ortho conversion in hydrogen (TUD)	8,0	x	x	x	
1200 Components (BMW)	17,0				
1210 Inner tank modelling (BMW)	3,0			x	x
1220 Pipes (BMW)	14,0	x	x	x	x
Sum WP	26,0				

	MM (TUD)	2008	2009	2010	2011
2000 Transient 1D modelling (BMW)					
2100 Component level modelling (IMG)	4,0				
2110 Pipe models (BMW)	4,0		x	x	x
Sum WP	4,0				

	MM (TUD)	2008	2009	2010	2011
3000 Software integration (IMG)					
3300 Universal library of fluid & other material properties (BMW)	3,0				
3310 Real gas property database (ANS)	3,0	x	x		
Sum WP	3,0				

	MM (TUD)	2008	2009	2010	2011
4000 Tools and models experimental verification (BMW)					
4100 Component verification (TUD)	38,0				
4110 Nozzle, pipe & valve (TUD)	18,0	x	x	x	x
4120 Inner tank (TUD)	10,0		x	x	x
4140 Insulation (BMW)	10,0		x	x	
Sum WP	38,0				

I.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Zugehörig zu den einzelnen Arbeitspaketen werden im Folgenden die Ausgangspunkte aus technischer bzw. wissenschaftlicher Sicht dargelegt:

Natürliche Konvektion und Stratifikation:

Am Lehrstuhl lag zu Beginn der Arbeit eine ganze Reihe von allgemein zugänglichen Veröffentlichungen über das Stratifikationsverhalten in Flüssigwasserstoffbehältern vor. Insbesondere die thermische Stratifikation in großen Tankbehältern – etwa aus dem Kontext der Raumfahrt – ist ein weitreichendes Themengebiet. In einer hauseigenen Studie im Rahmen einer Diplomarbeit [3] konnte die Ausgangsposition im Hinblick auf Laborkannen für Flüssigwasserstoff nochmals deutlich verbessert werden.

Para-ortho-Umwandlung in Wasserstoff:

Die para-ortho- bzw. die ortho-para-Umwandlung ist aus dem Bereich der Wasserstoffverflüssigung und der Raumfahrt bezüglich des flüssigen Wasserstoffs ein weithin bekanntes und behandeltes Phänomen. Jedoch ist der Zielbereich des hier durchgeführten Projektes durch den neuen Kryodrucktank ein Temperatur- und Druckbereich der bislang kaum oder gar nicht bezüglich der Umwandlung betrachtet wurde. Am Lehrstuhl gab es hierzu erste Erfahrungen aus einer Studie der Nutzung der para-ortho-Umwandlung zur besseren Schildkühlung von Flüssigwasserstofftanks.

Innentankmodellierung:

Im Rahmen von Vorstudien konnten bereits fundierende Aussagen zu verschiedenen Strömungsphänomenen im Gas- und Flüssigkeitsgebiet bei Flüssigwasserstoffspeichern größerer Dimension gewonnen werden [4].

Rohrleitungen / Rohrleitungsmodelle:

Bezüglich der Betrachtung von Wärmeübertragungs- und Druckverlustproblemen lagen zu Projektbeginn der allgemein technische Stand aus dem VDI-Wärmeatlas [5] vor. Bezüglich der Thematik freie Konvektion in geneigten Rohrleitungen sind bereits im Vorfeld zum Projekt HySim Untersuchungen gelaufen [5], die die Dramatik des Effektes als besonderen Wärmeeintragsmechanismus bereits angedeutet haben. Vor diesem Hintergrund ist die-

sem Themengebiet innerhalb des TUD-Anteils von HySim eine große Bedeutung zugeschrieben worden.

Realgasdaten:

Vor Projektbeginn war der aktuelle Stand der Formulierung der Realgasdaten eine Zustandsgleichung für Parawasserstoff von 1982 [6], welche in von McCarty in dem Programm GASPAK mittels einer Anpassung der spezifischen Wärmekapazitäten des idealen Gases auf die Anwendung von Normalwasserstoff, Orthowasserstoff und Gleichgewichtswasserstoff erweitert wurde [7]. Dieser Stand wurde 2007 von Jacobsen et al. [8] bemängelt.

Thermoakustische Oszillation in Wasserstoffbehältern:

Die thermoakustische Oszillation kann in kryogenen Speicherbehältern bei großen Verhältnissen zwischen warmer und kalter Temperatur auftreten, wenn bestimmte Temperaturgradienten und Konstruktionsbedingungen auftreten. Sie führen zu einem erhöhten Wärmeeintrag in das kryogene System. Am Lehrstuhl fand bei Projektstart bereits eine Untersuchung zu thermoakustischen Oszillationen in Flüssigwasserstoffbehältern statt.

Isolationstechniken:

Die Vermessung thermischer Isolation in der Kryotechnik erfolgt üblicherweise mittels Verdampfungsmessung in einem Badkryostaten. Prinzip bedingt wird hier gegen eine feste Kalttemperatur gemessen. In aktuellen technischen Anwendungen, wie z. B. einem Kryodruck-Speicherbehälter, liegt ein breiteres Temperaturspektrum vor. Zur Abbildung dieses Einsatzfalls sind derzeit keine Veröffentlichungen neueren Datums bekannt.

I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Innerhalb des HySim Projekts wurde intensiv mit den weiteren Projektpartner zusammengearbeitet. Im konkreten Fall gab es mit den folgenden Projektpartnern einen regen wissenschaftlichen Austausch in den einzelnen Teilprojekten:

1000 3D Modelling (ANS)	BMW	ANSYS	LMS – G	LMS – F
1100 Physical phenomena (ANS)				
1130 Natural convection and stratification (ANS)		x		
1160 Para-ortho conversion in hydrogen (TUD)	x	x		
1200 Components (BMW)				
1210 Inner tank modelling (BMW)	x			
1220 Pipes (BMW)	x	x		

2000 Transient 1D modelling (BMW)	BMW	ANSYS	LMS – G	LMS – F
2100 Component level modelling (IMG)				
2110 Pipe models (BMW)	xx			

3000 Software integration (IMG)	BMW	ANSYS	LMS – G	LMS – F
3300 Universal library of fluid & other material properties (BMW)				
3310 Real gas property database (ANS)	x	x	x	x

4000 Tools and models experimental verification (BMW)	BMW	ANSYS	LMS – G	LMS – F
4100 Component verification (TUD)				
4110 Nozzle, pipe & valve (TUD)	x	x		
4120 Inner tank (TUD)	x			
4140 Insulation (BMW)	x			

Zusätzlich zum wissenschaftlichen Austausch innerhalb des Konsortiums sind verschiedene Recherdienste der folgenden universitätsnahen / -zugehörigen Stellen in Anspruch genommen worden:

1. Sächsische Landesbibliothek – Staats- und Universitätsbibliothek Dresden (SLUB), www.slub-dresden.de
2. Patentinformationszentrum Dresden, Kooperationspartner des Deutschen Patent- und Markenamtes, <http://tu-dresden.de/forschung/piz>

II. Eingehende Darstellungen

II.1 Verwendung der Zuwendung

Im Rahmen des Projektverlaufes von HySim haben sich einige Themengebiete – angelehnt an die definierten Arbeitspakete – herauskristallisiert, welche einen besonders intensiveren Forschungsbedarf seitens des Konsortiums bedurften. Im Folgenden werden grob die Arbeitsinhalte dargeboten, die im Rahmen der Zuwendung abgearbeitet worden sind. Die Zuordnung der Personalaufwendungen ergeben sich gemäß Abschnitt I.3. Die Auflistung der Sachkostenaufwendungen für erhebliche Anschaffungen ergibt sich aus der Tabelle in Abschnitt II.2.

II.1.1 Stoffdaten von Fluiden und Konstruktionswerkstoffen unter kryogenen Bedingungen

Ziel der Untersuchungen:

Zu Projektbeginn ist innerhalb des Konsortiums vereinbart worden, eine einheitliche Basis für die verwendeten Stoffdaten für Festkörper und Fluide zu verwenden. Zusätzlich sollte auf Grundlage dieser Basis die Implementierung in die entsprechenden Programmsysteme erfolgen.

Ablauf der Untersuchungen:

- Recherche über kommerziell verfügbare Stoffdatenprogramme für Festkörper mit Fokus auf den kryogenen Temperaturbereich (vgl. Abbildung)
- Abgleich von kommerziell verfügbaren Stoffdatenbanken
- Abgleich der enthaltenen Datensätze mit aktuellen Literaturquellen
- Abstimmung eines universellen Datenformats mit HySim-Partnern
- Erstellung von Stoffdatendateien für typische Konstruktionswerkstoffe und anderen eingesetzten Festkörpern im Temperaturbereich 20 K – 300 K
- Ausgabe der erstellten Datendateien an HySim-Partner zur Verwendung als einheitliche Stoffdatenbasis innerhalb des Projektes

Ergebnis der Untersuchungen:

Im Ergebnis dieser Arbeit konnten ein einheitlicher Standard für die projektbezogenen Stoffdaten gefunden und für alle Projektpartner definiert werden. Zu diesem getroffenen Standard liegen zudem umfangreiche und sorgsam recherchierte Daten vor, die die Verwendung rechtfertigen.

Die geleistete Arbeit gliederte sich in das Arbeitspaket 3310 ein. Es beinhaltet die Themen des Arbeitspakets 3320, welches im Zuge des Projektfortganges thematisch in das Arbeitspaket 3310 eingegliedert wurde.

Im Rahmen der Untersuchung entstand keine Veröffentlichung.

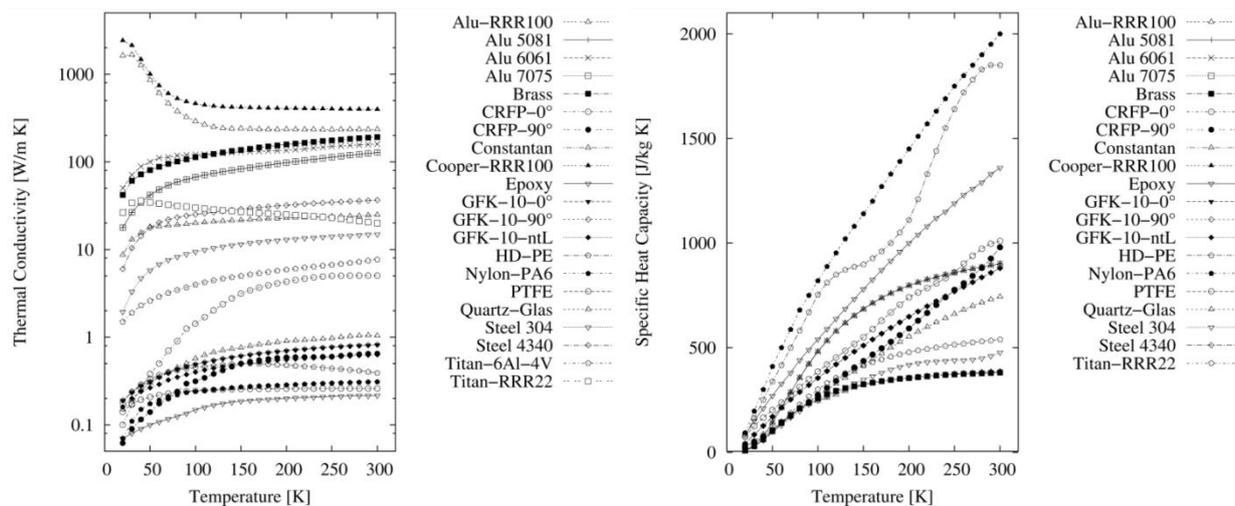


Abb. 1: Thermische Leitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität von typischen Konstruktionsmaterialien im kryogenen Temperaturbereich

II.1.2 Untersuchungen zur thermischen Stratifikation in Wasserstoff-Laborkannen

Ziel der Untersuchungen:

Die thermische Stratifikation ist in großen Wasserstoffspeicherbehältern ein weit bekanntes und gleichzeitig auch wohl beachtetes Thema. Innerhalb von Speicherbehältern kleinerer Dimension – inklusive Wasserstoffspeichertanks für automobile Anwendungen – spielte die thermische Stratifikation bisher nur eine untergeordnete Rolle und galt als existent aber undramatisch. Ziel der hier durchgeführten Analysen war, die zu erwartende thermische Stratifikation in LH₂ und cCH₂ Speichern abzuschätzen und ggf. Rückschlüsse auf eventuelle Probleme im späteren Betrieb zu ziehen. Zusätzlich sollte der Fragestellung nachgegangen werden, welche Zeitskalen für den Schichtungs Aufbau zu erwarten sind.

Ablauf der Untersuchungen:

- Modellbildung und Validierung anhand von Standard-Speicherbehältern für Flüssighelium und Flüssigwasserstoff herangezogen.
- Untersuchungen zur Aufteilung einfallender Wärmeströme in den kryogenen Speicher und die resultierenden Strömungs- und Wärmetransportvorgänge.
- Entwickeln von Modellansätzen zur Prognose von thermischer Stratifikation
- Validierung der erzielten Modellergebnisse erfolgte mit Messwerten
- Analysen zur Durchführung von „fehlerminimierten“ Messungen von thermischer Stratifikation in stagnierenden Strömungen (Sensorselbstüberhitzungseffekte)

Ergebnis der Untersuchungen:

Im Ergebnis der Untersuchungen konnten die zu erwartenden thermischen Stratifikationseffekte in Speicherbehältern kleiner Dimension für LH₂ numerisch und experimentell dargestellt werden.

Analysen zur Sensorselbstüberhitzung bei der Temperaturmessung mit Widerstandsthermometern in stagnierenden Fluiden konnte ein Zusammenhang abgeleitet werden, der eine Abschätzung des Messfehlers erlaubt.

Die geleistete Arbeit gliederte sich in das Arbeitspaket 1130 ein.

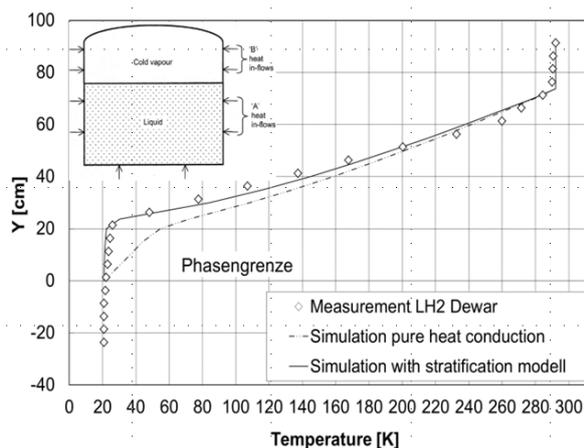


Abb. 2: Simulation und Messung der thermischen Stratifikation in einem LH₂ Labordewar.



Abb. 3: Typischer Laborspeicherbehälter für LHe oder LH₂

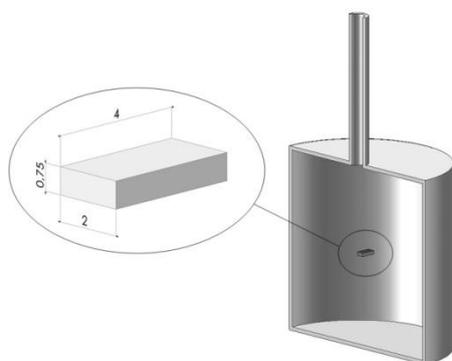


Abb. 4: Modellgeometrie zur numerischen Ermittlung der Sensorelberhitzung bei aktiven Widerstandsthermometern

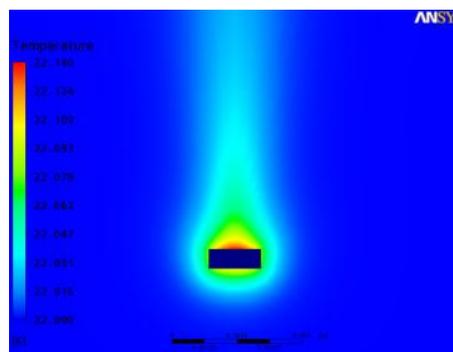


Abb. 5: Numerisch berechnetes Temperaturfeld um ein aktives Widerstandsthermometer mit ohmscher Leistungsgenerierung

Im Rahmen der Untersuchung entstanden zwei Veröffentlichungen.

Langebach, R.; Haberstroh, Ch.: Simulation von Stratifikationseffekten in der Gasphase von LH₂-Speicherbehältern. DKV-Tagung, Ulm, 2008, Bd. I, S. 295-304

Langebach, R.; Haberstroh, Ch.: Numerical Simulation of Temperature Sensor self-heating Effects in gaseous and liquid Hydrogen under cryogenic Conditions. Cryogenic Engineering Conference, Adv. in Cryogen. Eng., Tucson, Arizona, 2009

II.1.3 Para-Ortho-Umwandlung in Wasserstoff

Ziel der Untersuchung

Die para-ortho-Umwandlung bietet die Möglichkeit einen Teil der im Molekül vorhandenen thermischen Energie durch die Umwandlung in Form des Rotationsspins zu speichern, was sich beim Druckaufbau des Tanks positiv auswirkt, da dieser langsamer abläuft. Zudem unterscheiden sich die die Allotrope Orthowasserstoff und Parawasserstoff in ihren thermischen Zustandsgrößen und in ihren Transportgrößen. Die Umwandlung kann immer nur bis zum temperaturabhängigen Gleichgewicht erfolgen. Damit dieser Effekt eingesetzt werden kann ist es notwendig, dass er schnell genug abläuft. Bei der Umwandlung muss in die sogenannte Selbstumwandlung und die katalytische Umwandlung unterschieden werden. Ziel der durchgeführten Untersuchungen ist es die auftretenden Phänomene

wie die Geschwindigkeiten der Umwandlung zu beschreiben und diese mittels Messungen zu validieren, damit bei den angestrebten Simulationen stets die richtigen Zustandsgrößen verwendet werden.

Ablauf der Untersuchung

- Recherche der ablaufenden Prozesse der Selbstumwandlung und der katalytischen Umwandlung
- Design und Konstruktion eines Messaufbaus zur Messung der Parawasserstoffanteile von Wasserstoff und zur Bestimmung der katalytischen Aktivitäten verschiedener Materialien
- Validierung der Funktion der Messapparatur durch Messungen
- Recherche nach genauen Stoffdaten für die Messdatenauswertung
- Vermessung der katalytischen Aktivität verschiedener Materialien
- Beschreibung der Selbstumwandlung anhand von Literaturdaten in einem Kryodruckspeicher

Ergebnisse

Im Ergebnis der Arbeiten konnten die Unterschiede der Selbstumwandlung und der katalytischen Umwandlung für die Verwendung in den Simulationen dargestellt werden (Deliverable 2.3). Die Funktion des Messaufbaus zur Bestimmung von Parawasserstoffanteilen konnte nachgewiesen werden. Die hierfür notwendige Recherche der aktuell genauen Stoffdaten wurde mit den Projektteilnehmern mitgeteilt und auftretende Probleme kommuniziert. Es wurden verschiedene Materialien bezüglich Ihrer katalytischen Aktivität untersucht, darunter auch die Konstruktionsmaterialien des Kryodrucktanks. Bei diesen konnte keine signifikant erhöhte Umwandlung gemessen werden. Das Maß der notwendigen Beschleunigung der Selbstumwandlung wurde in einer Veröffentlichung dargestellt.

Die Arbeit gliedert sich in die Arbeitspakete 1160 und 4120 ein.

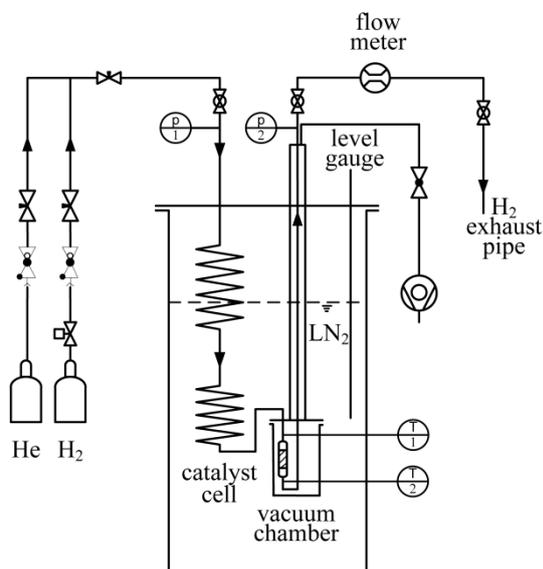


Abb. 6: Fließbild der Messapparatur zur Bestimmung von Parawasserstoffanteilen und katalytischen Aktivitäten von Materialien

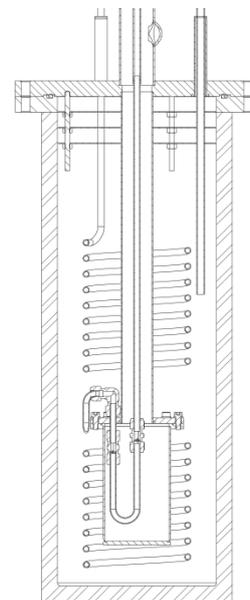


Abb. 7: Konstruktionszeichnung der Messapparatur zur Bestimmung von Parawasserstoffanteilen und katalytischen Aktivitäten von Materialien

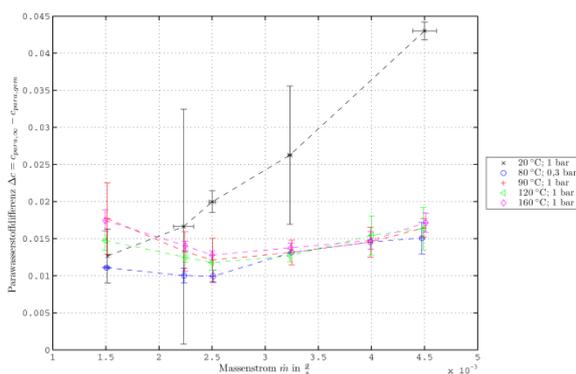


Abb. 8: Ergebnisse der Validierungsmessungen zur Funktionstauglichkeit der Messapparatur

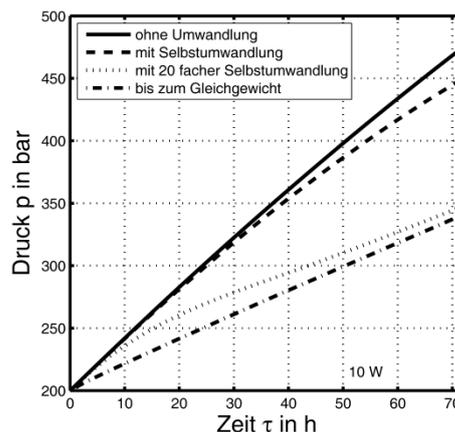


Abb. 9: Ergebnis der Berechnung des Druckaufbaus in einem Kryodruckspeicher bei einem Wärmeeinfall von 10 W ohne Selbstumwandlung, mit Selbstumwandlung, bei einer Umwandlung bis in den Gleichgewichtszustand und einer Abschätzung der notwendigen Aktivität im Tank für einen praktischen Nutzen

Im Rahmen der Untersuchung entstanden fünf Veröffentlichungen

Essler, J. and Haberstroh, Ch., Construction of a para-ortho-hydrogen test cryostat, Advances in Cryogenic Engineering 55A, edited by J. G. Weisend II et al., AIP, New York, 2010, pp. 305-310.

Essler, J., Haberstroh, Ch.: Stoffdaten von Ortho- und Parawasserstoff im tiefkalten Bereich, DKV Tagung, Berlin, 2009, AA I 01.

Essler, J., Haberstroh, Ch., Comparison of Different Equations of State for Hydrogen, Proceedings of the Twenty-Third International Cryogenic Engineering Conference, edited by Maciej Chorowski et al., Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2011, pp. 307-312.

Essler, J.; Haberstroh, Ch., Performance of an Ortho-Para Concentration Measurement Cryostat for Hydrogen, Advances in Cryogenic Engineering, Proceedings of the 2011 Cryogenic Engineering Conference, Spokane, Washington, 2011, to be published. (Accepted)

Essler, J., Haberstroh, Ch., Hesse, U.: Technische Relevanz der para-ortho-Umwandlung von Wasserstoff in tiefkalten, mobilen Wasserstoffspeichern, DKV Tagung, Aachen, 2011, AA I 14.

II.1.4 Innentankmodellierung / Tankwärmeübertrager

Ziel der Untersuchungen:

Die thermische Stratifikation ausgelöst durch den Restwärmeeintrag von außen ist im Rahmen der Untersuchungen zur Arbeitspaket 1130 abgearbeitet worden. Im Fall des Kryodruckwasserstofftanks ergibt sich zusätzlich die Notwendigkeit einen Tankwärmetauscher zu integrieren. Dieser liefert durch massive Wärmezufuhr im Bedarfsfall die nötige Energie zum Halten eines entsprechenden Tanksdrucks, der für den Fahrzeugbetrieb notwendig ist. Ziel der Untersuchungen war die Fragestellung nach der entstehenden thermischen Stratifikation unter massiver Wärmezufuhr durch den Tankwärmeübertrager. Vor dem Hintergrund des ständig zu überwachenden Füllstandes ergaben sich hier zunehmend unerforschte Themen.

Ablauf der Untersuchungen:

- Modellbildung für eine vereinfachte numerische Analyse am Tankmittelschnitt
- Transiente Simulationen zur thermischen Stratifikation
- Analysen zum Auf- und Abbau der thermischen Schichten
- Beiträge zur Korrelationsanpassung für einen BMW-typischen Tankwärmeübertrager
- Rückschlüsse auf mögliche Herausforderungen im späteren Fahrbetrieb

Ergebnis der Untersuchungen:

Im Ergebnis der Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass sich eine signifikante Temperaturschichtung bei Betrieb des Tankwärmeübertragers einstellt. Die Zeitskala zum Aufbau dieser Schichtung ist vergleichsweise kurz, im Bereich weniger Sekunden. Die Zeitskala zum Abbau der vorher generierten Schichtung ohne aktives Mischen ist dann vergleichsweise lang im Bereich von mehreren Minuten bis Stunden.

Die geleistete Arbeit gliederte sich in das Arbeitspaket 1210 überlappend mit 4120 ein.

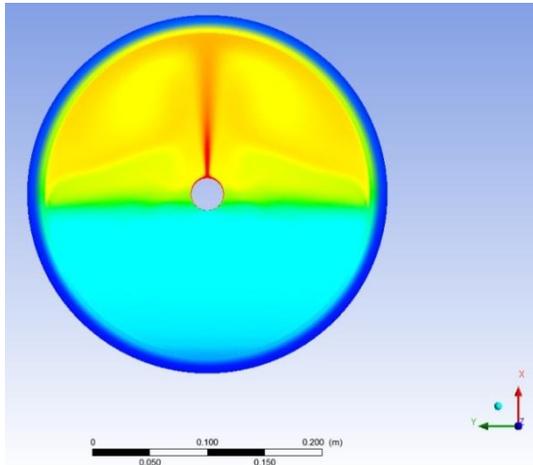


Abb. 10: Numerische Simulation der thermischen Schichtung in einem 2D Schnittmodell des Kryodrucktanks.

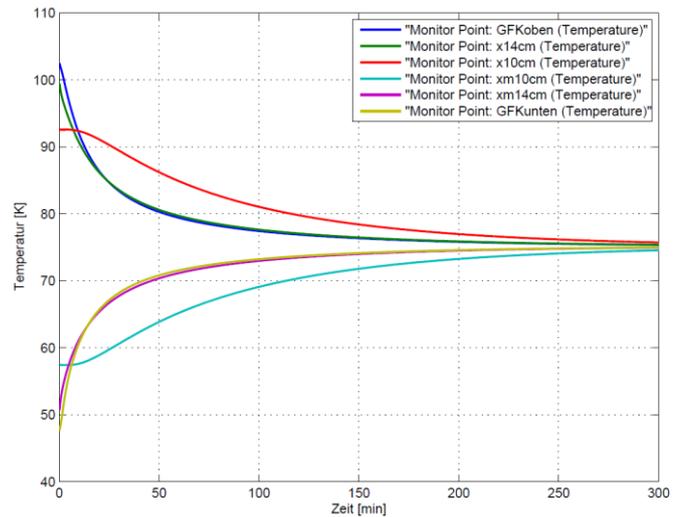


Abb. 11: Transiente Analyse (hier Zeitreihen) des störungsfreien Ablaufs der Schichtungsauflösung nach Abschalten des Tankwärmeübertragers

Im Rahmen der Untersuchung entstand keine Veröffentlichung.

II.1.5 Natürliche Konvektion in geneigten Rohrleitungen

Ziel der Untersuchungen:

Die Minimierung des Wärmeeintrages ist eine Kernaufgabe bei der Entwicklung und Optimierung von kryogenen Speichersystemen. Ein beträchtlicher Anteil dieses Wärmeeintrags ist durch die notwendigen Verbindungsleitungen zwischen kaltem Innenbehälter und warmer Umgebung verursacht. Durch den vorliegenden Temperaturgradienten ist hierbei der Wärmestrom aufgrund der Längswärmeleitung im Rohrmaterial sowie der innenliegenden Fluidsäule unvermeidlich. Aufgrund konstruktiver Belange muss insbesondere bei liegenden Tankbehältern in Automobilen mitunter von der vertikalen Einbaulage dieser Rohrleitungen abgewichen werden. Abhängig vom Neigungswinkel der Leitung oder des Leitungsabschnittes kann sich unter Umständen im Inneren eine Konvektionsströmung des Fluides aufbauen. Der resultierende Wärmetransport zwischen dem warmen und dem kalten Ende der Leitung kann dadurch signifikant erhöht werden.

Der Effekt der freien Konvektion in geneigten Rohrleitungen wurde im Rahmen von HySim in zweierlei Hinsicht als besonders interessantes Forschungsgebiet identifiziert.

1. Der Effekt soll mit den verfügbaren numerischen Werkzeugen hinreichend genau nachgerechnet werden können. Dazu sollte anhand eines entsprechenden Testexperiments eine Vergleichsmöglichkeit zwischen numerisch berechneten und experimentell ermittelten Geschwindigkeits- und Temperaturprofilen geschaffen werden.
2. Der Effekt soll durch direkte Messung des übertragenen Wärmestroms durch die Rohrleitung quantifiziert und in seiner Gesamtheit charakterisiert werden. Dazu ist eine experimentelle Betrachtung an realen Geometrien und unter kryogenen Temperaturbedingungen zwingend erforderlich gewesen.

Ablauf der Untersuchungen:

1. Phase

- Theoretische Grundlagen zur Verwendung eines Modellfluides in einem geeigneten Modellexperiment
- Aufbau eines zuvor konzeptionierten Teststands zur Messung der Geschwindigkeitsverteilung in einer geneigten, isolierten Rohrleitung aus Glas, Modellfluid Kältemittel R125
- Beschaffung des Laser-Doppler-Anemometers zur berührungslosen Geschwindigkeitsmessung
- Durchführung von umfangreichen Messreihen zum Vergleich mit parallel durchgeführten numerischen Simulationen
- Vergleiche zwischen angestellten LDA-Messungen und Vergleichsrechnungen vom Projektpartner Ansys

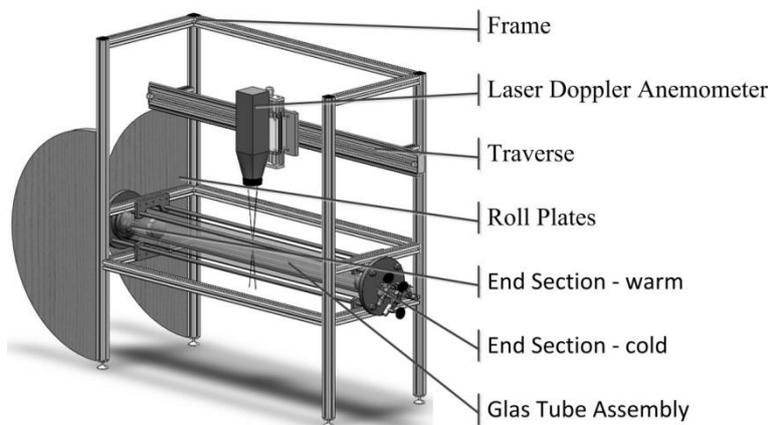


Abb. 12: Modell des Versuchsstandes zur LDA-Messung in einer geneigten Rohrleitung unter Verwendung eines Modellfluides zur Darstellung des Konvektionsverhaltens von kryogenem Wasserstoff unter Hochdruck

2. Phase

- Eingrenzen der möglichen Dimensionen und Randbedingungen von kryogenen Rohrleitungen in Speichersystemen
- Aufbau eines zuvor konzeptionierten Teststands zur Messung des Wärmedurchgangs durch eine geneigte Rohrleitung aus Edelstahl, gefüllt mit Hochdruckgas Helium oder Wasserstoff
- Durchführung von umfangreichen Messreihen zum Vergleich mit parallel durchgeführten numerischen Simulationen
- Gezielte Studie zum Einfluss der geometrischen Randbedingungen sowie der Stoffeigenschaften
- Vergleiche zwischen angestellten Messungen und Rechnungen mit Ansys CFX

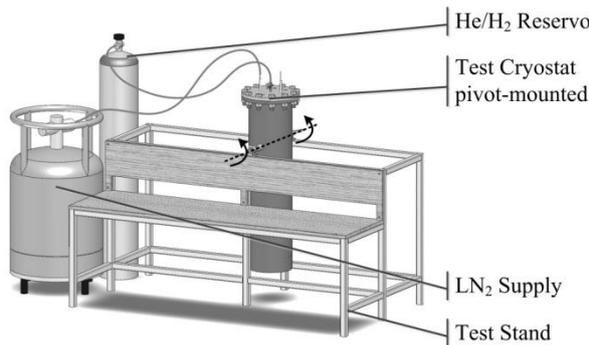


Abb. 13: Versuchsaufbau zur Vermessung des Wärmetransportes durch eine geneigte Rohrleitung gefüllt mit Hochdruckgas, Helium oder Wasserstoff, einseitig beheizt auf Umgebungstemperatur, einseitig gekühlt auf LN₂-Temperatur

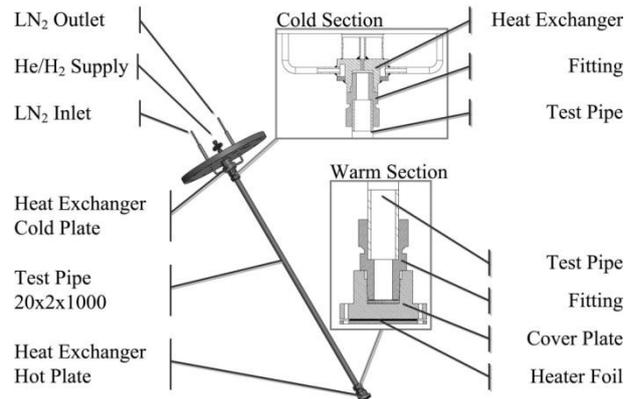


Abb. 14: Innenaufbau des Kryostaten zur Vermessung des Wärmetransportes durch eine geneigte Rohrleitung

Ergebnis der Untersuchungen:

Das Ergebnis der Untersuchungen lässt sich wiederum anhand der beiden Phasen darstellen.

1. Phase

Es konnte eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den numerisch berechneten und experimentell gewonnenen Geschwindigkeitsprofilen an den konkreten Messpunkten festgestellt werden. Der CFD-Code Ansys CFX erscheint daher zur Darstellung der internen Strömungsphänomene gut geeignet – besonders unter Verwendung der industrieeüblichen Turbulenzmodelle.

2. Phase

Es konnte eine teilweise sehr gute Übereinstimmung zwischen den numerisch berechneten und experimentell gewonnenen Wärmeströmen durch die Rohrleitung festgestellt werden. In einzelnen Neigungswinkelbereichen stellen sich dabei außerordentlich gute Vergleichsergebnisse ein, in anderen Winkelbereich weichen die numerisch berechneten Ergebnisse von den experimentell ermittelten Werten signifikant ab. Gleiches stellte sich für die gemessenen Temperaturverteilungen an der Ober- und Unterseite der Rohrleitung ein.

Die geleisteten Arbeiten gliederten sich in die Arbeitspakete 1220 und 4110 ein.

Im Rahmen der Untersuchung entstanden 3 Veröffentlichungen.

Langebach, R.; Haberstroh, Ch.: Wärmeeintrag in kryogene Speichersysteme durch freie Konvektion in Rohrleitungen. DKV-Tagung, Berlin, Band I, 2009

Langebach, R.; Haberstroh, Ch.: Free convective heat transfer in inclined pipes as a mechanism of heat intake to cryogenic devices. Proc. ICEC Conference, Wroclaw/Poland, July 2010

Langebach, R.; Haberstroh, Ch.: Experimental investigation of free convective heat transfer along inclined pipes in high-pressure cryogenic storage tanks. Proc. CEC Conference, Spokane/USA, June 2010

II.1.6 Thermoakustische Oszillationen in Rohrleitungen

Ziel der Untersuchung

Unter bestimmten Verhältnissen ist es möglich, dass ein zusätzlicher Wärmeeintrag in kryogenen Systeme durch thermoakustische Oszillation auftreten kann. Diese treten in erster Linie bei Systemen mit Helium auf. Auf bei der Verwendung von flüssigen Wasserstoff ist es möglich, dass es zu Oszillationen kommt. Ziel der Untersuchung ist es mit dem bereits an der TU Dresden entwickelten Modell zu untersuchen, ob es bei den thermodynamischen und geometrischen Bedingungen im Kryodrucktank ebenfalls zu thermoakustischen Oszillationen kommen kann.

Ablauf der Untersuchung

- Analyse der möglichen thermodynamischen Zustände des Kryodrucktanks zur Identifizierung der geeignetsten Bedingungen für eine Oszillation
- Analyse der Geometrie der Rohrleitungen am Kryodrucktank zur Identifizierung der geometrischen Randbedingungen
- Anpassung des vorhandenen Modells an die neuen Randbedingungen
- Analyse verschiedener Tankzustände
- Erstellung von Konstruktionsrichtlinien zur Vermeidung von thermoakustischen Oszillationen

Ergebnisse der Untersuchung

Unter den gegebenen Randbedingungen ist es theoretisch möglich, dass es zu einer thermoakustischen Oszillation kommt. Um dies zu vermeiden wurden Ratschläge für konstruktive Anpassungen ausgearbeitet (Deliverable 4.1). Bei Beachtung ist es unwahrscheinlich, dass es am Kryodrucktank zu Oszillationen kommt.

Die geleisteten Arbeiten gliederten sich in das Arbeitspaket 2110 ein.

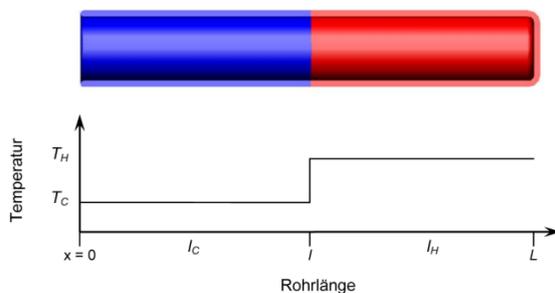


Abb. 15: Rohr, in dem es auf Grund eines diskreten Temperatursprungs und der gegebenen Längenaufteilung (Längenverhältnis) zu einer thermoakustischen Oszillation kommen kann.

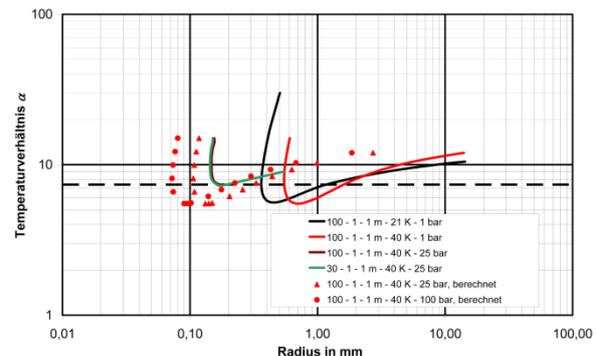


Abb. 16: Stabilitätskurven in einem Temperaturverhältnis-Innenradius-Diagramm verschiedener Randbedingungen eines Kryodrucktanks.

II.1.7 Thermische Isolation für Kryodruckwasserstofftanks

Ziel der Untersuchung

Der vorliegende Einsatzfall des Kryodrucktanks lässt sich mit aus Literatur verfügbaren thermischen Untersuchungen von Superisolation nicht abbilden. Die in aller Regel verwendeten Badkryostate sind auf die Siedetemperatur der eingesetzten kryogenen Flüssigkeit festgelegt. Mit einem an der TU

II.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Lfd. Nr. (Beleg-Nr.)	Datum des Zugangs	Stück	Bezeichnung des Gegenstandes	Lieferfirma	vorgesehene weitere Verwendung
1 (3082)	04.03.09	1	Thermischer Massedurchfluss-messer	SCHWING Verfahrenstechnik GmbH Neukirchen-Vluyn	in Gebrauch
2 (3772)	14.04.09	1	Piezoresistiver Drucktransmitter	Keller Ges. f. Druckmesstechnik mbH Jestetten	in Gebrauch
3 (4029)	17.04.09	1	Elektronische Bodenwaage mit Auswertegeräte, Software	Rhewa Waagenfabrik Mettmann	in Gebrauch
4 (6822)	02.07.09	3	Massedurchflussmessgeräte	Wagner Mess- und Regeltechnik GmbH Offenbach	in Gebrauch
5 (10584)	25.08.09	1	Messwert-Erfassungssystem (IOT-Personal DAQ/3001, IOT-PDQ30, IOT-TR-2U, FRE-CA-179-31	synoTech Sensor und Messtechnik GmbH Linnich	in Gebrauch
6 (131 u. 12220)	27.08.09 16.11.09	1	Laser Doppler Anemometer, Analogeingang inkl. Schulung und Inbetriebnahme	DANTEC Dynamics GmbH Ulm	in Gebrauch
7 (50)	14.02.11	1	Kalorimeter Kryostat, Durchflussmesser, Vakuum-Messausrüstung, Heiz- und Kühlregler	CryoVac Ges. f. Tieftemperaturtechnik mbH & Co. KG Troisdorf	in Gebrauch

II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Im Rahmen des Projekts HySIM sollte eine Reihe von Simulationsmethoden und –Werkzeugen entwickelt bzw. basierend auf bestehenden Werkzeugen weiterentwickelt und validiert werden, die bei der Auslegung und Optimierung von Wasserstoffspeichersystemen für Kraftfahrzeuge zum Einsatz kommen sollen. Alle geleisteten Arbeiten ordnen sich dieser Zielvorgabe ausnahmslos unter.

Validierung CFD Code Ansys CFX / Natürliche Konvektion und Stratifikation:

Der kommerzielle CFD Code Ansys CFX ist dabei in direkter Zusammenarbeit mit dem Projektpartner Ansys an geeigneten Testfällen validiert worden. Dieser Schritt ist zugehörig zu den übergeordneten Zielen von HySim und insbesondere notwendig für eine Qualifizierung des Codes für spätere, komplexe Berechnungsmodelle. Experimentelle Vergleichswerte zur Validierung lagen in diesem Druck- und Temperaturbereich aus allgemein zugänglichen Quellen nicht oder nicht gebrauchsfähig vor. Da der Aufwand der experimentellen Ermittlung von Geschwindigkeitsprofilen unter kryogenen Temperaturrandbedingungen als unangemessen hoch eingeschätzt wurde, ist der Weg über das „wasserstoffähnliche“ Modellsystem eingeschlagen worden. Dieser hat sich im Rahmen der der Zuwendungshöhe als gangbar und dabei ähnlich aussagekräftig herausgestellt. Die zusätzlich gewonnen Vergleichswerte zum Wärmetransport in geneigten Rohrleitungen stellen in der Gesamtheit ein umfassendes Messdatenportfolio dar, welches hinreichende Aussagen über die zu erwartende Genauigkeit bei der Verwendung von Ansys CFX in diesem Themengebiet zulässt.

Realgasdaten:

Die Verwendung von möglichst genauen Realgasdaten für alle Wasserstoffallotrope ist auf Grund der gravierenden Unterschiede in den Eigenschaften der Allotrope Orthowasserstoff und Parawasserstoff unerlässlich. Damit die im Projekt von allen Teilnehmern erzielten Ergebnisse vergleichbar sind ist es zwingend notwendig, dass eine einheitliche Datenbases vorhanden ist. Im Verlauf des Projektes wur-

den neue Zustandsgleichungen für Wasserstoff entwickelt, was eine kontinuierliche Bearbeitung des Arbeitspunktes erforderlich machte. Durch die Verwendung einer einheitlichen und stets aktuellen Datenbasis konnte eine gute Vergleichbarkeit der Daten zu Messungen erzielt werden.

Para-ortho Umwandlung in Wasserstoff:

Die para-ortho- bzw. die ortho-para-Umwandlung von Wasserstoff wurde in nach großen Forschungsvorhaben in den 60er Jahren lange vernachlässigt. Durch die anfängliche Aufarbeitung der Literatur ist war es möglich die wichtigen grundlegenden Zusammenhänge der para-ortho-Umwandlung im Kryodrucktank darzustellen und diese vom Projektpartner in die Simulation mit zu integrieren. Da verschiedene mögliche Randeffekte dabei nicht beachtet werden war es notwendig eine Messapparatur zu entwickeln, welche den Parawasserstoffanteil bestimmen kann. Dies konnte erfolgreich durchgeführt werden. Die gebaute Apparatur kann zudem für weitere Messungen der katalytischen Aktivität verschiedenster Materialien verwendet werden. Die erreichten Ergebnisse zeigt zudem den weiteren notwendigen Forschungsbedarf in diesem Bereich auf und rechtfertigt damit die Ausgaben, die hierfür getätigt wurden.

Isolationstechniken:

Die thermische Isolation kryogener Speicherbehälter ist notwendiger weise sehr hoch entwickelt. Bei üblichen Dewarbehältern ist die Kalttemperatur durch die Siedetemperatur der eingesetzten kryogenen Flüssigkeit festgelegt. Für diesen Einsatzfall existieren Flüssighelium- bzw. Flüssigstickstoffbadkryostate zur Vermessung von Superisulationsmaterialien. Systematische Untersuchungen bei frei einstellbarer Kalttemperatur sind kaum oder gar nicht vorhanden. Daher ist das Konzept eines Durchflusskryostats im Verlauf der HySIM Projektes umgesetzt worden. Erste Messungen haben gezeigt, dass die konstruktive Ausführung im Detail nicht den Erwartungen und der zugrunde gelegten Auslegungsberechnung entspricht. Ein Umbau und weitere Orientierungsversuche waren notwendig. Mit der Vermessung von Superisulationsfolien bei frei einstellbarer Kalttemperatur ist eine Aufgabenstellung aufgegriffen worden, die für Anwendungsfälle wie dem Kryodrucktank untersucht werden muss. Es besteht derzeit keine Datenbasis zu thermischen Eigenschaften von Superisolation bei variierender Kalttemperatur.

II.4 Voraussichtlicher Nutzen

Die Forschungsergebnisse der TU Dresden sollen vorrangig im Sinne der Wissenschaft weiterverwertet werden. Zu diesem Zweck sind innerhalb des Projektes bereits eine große Anzahl von Veröffentlichungen entstanden, die die freigegebenen Ergebnisse zugänglich machen sollen.

Es ist weiterhin geplant die Forschungsergebnisse im Rahmen von gegenwärtig in Bearbeitung befindlichen Doktorarbeiten wiederzuverwerten.

Einer Verwertung der Forschungsergebnisse durch die HySim-Projektpartner im Rahmen der jeweiligen weiteren Verwertungspläne steht die TU Dresden in jeder Hinsicht positiv gegenüber.

II.5 Fortschritt bei anderen Stellen

Im Projektzeitraum von HySim sind der TU Dresden im Bereich der von BMW präferierten Kryodrucktechnologie (cCH₂) keine nennenswerten Fortschritte in anderen industriellen oder akademischen Einrichtungen bekanntgeworden.

II.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen

Langebach, R.; Haberstroh, Ch.: Wärmeeintrag in kryogene Speichersysteme durch freie Konvektion in Rohrleitungen. DKV-Tagung, Berlin, Band I, 2009

Langebach, R.; Haberstroh, Ch.: Free convective heat transfer in inclined pipes as a mechanism of heat intake to cryogenic devices. Proc. ICEC Conference, Wroclaw/Poland, July 2010

Langebach, R.; Haberstroh, Ch.: Experimental investigation of free convective heat transfer along inclined pipes in high-pressure cryogenic storage tanks. Proc. CEC Conference, Spokane/USA, June 2010

Essler, J., Haberstroh, Ch., Technische Relevanz der para-ortho-Umwandlung von Wasserstoff in tiefkalten, mobilen Wasserstoffspeichern, Aachen, 2011, AA I 14.

Essler, J.; Haberstroh, Ch., Performance of an Ortho-Para Concentration Measurement Cryostat for Hydrogen, Advances in Cryogenic Engineering, Proceedings of the 2011 Cryogenic Engineering Conference, Spokane, Washington, 2011, to be published. (Accepted)

Essler, J., Haberstroh, Ch., Comparison of Different Equations of State for Hydrogen, Proceedings of the Twenty-Third International Cryogenic Engineering Conference, edited by Maciej Chorowski et al., Oficyna Wydawnicza Politechniki Wroclawskiej, Wroclaw, 2011, pp. 307-312.

Essler, J., Haberstroh, Ch., Stoffdaten von Ortho- und Parawasserstoff im tiefkalten Bereich, DKV Tagung, Berlin, 2009, AA I 01.

Essler, J. and Haberstroh, Ch., Construction of a para-ortho-hydrogen test cryostat, Advances in Cryogenic Engineering 55A, edited by J. G. Weisend II et al., AIP, New York, 2010, pp. 305-310.

Funke, Th. ; Haberstroh, Ch. :Konzeption eines Kryostaten für Wärmedurchgangsmessungen., DKV-Tagungsbericht, AA I., Magdeburg, November, 2010.

Funke, Th. ; Haberstroh, Ch. : Performance measurements of multilayer insulation at variable cold temperature, Th. Funke, Ch. Haberstroh. CEC Conference, Spokane/USA, June 2010

Funke, Th. ; Haberstroh, Ch. :Vermessung von Superisolation bei frei einstellbarer Kalttemperatur. DKV-Tagungsbericht, AA I, Aachen, November, 2011.

Anhang: Literaturverzeichnis

- [1] HySim (2008) Simulationsmodule für die Entwicklung von Wasserstoff-Fahrzeugspeichern, Teil 1: Vorhabensbeschreibung, HySim, 2008.
- [2] Neuplanungen, wie dem Projektträger am 25.06.2010 schriftlich kommuniziert.
- [3] S. Albert: Stratifikation in mobilen LHe- und LH2 Dewarbehältern, Diplomarbeit, Bitzer-Stiftungsprofessur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentchnik, 2007
- [4] R. Scurlock: Low Loss Dewars and Tanks: A Basis for Designing Efficient Cryogenic Storage and Handling Systems, Cryogenic Society of America, 2004
- [5] Hieke, M. ; Haberstroh, Ch. ; Quack, H.: Heat transfer in gas filled pipes with closed warm end under different orientations. In: Proceedings of the International Cryogenic Engineering Conference - ICEC (2000)
- [6] Younglove, B. A.: Thermophysical Properties of Fluids. I. Argon, Ethylene, Parahydrogen, Nitrogen, Nitrogen Trifluoride, and Oxygen. In: Journal of Physical and Chemical Reference Data (1982), Nr. S1
- [7] Cryodata inc. (Hrsg.): Users Guide to GASPAK. CRYODATA INC., 1999. – Version 3.3
- [8] Jacobsen, R., Leachman, J., Penoncello, S., Lemmon, E.: Current Status of Thermodynamic Properties of Hydrogen. In: International Journal of Thermophysics 28 (2007), Juni, Nr. 3, S. 758–772

Anlage: Erfolgskontrollbericht

Der Erfolgskontrollbericht ist als eigenständiges Dokument verfügbar.