



**- Abschlussbericht zum Projekt HyInnoICE –
AP 5: Studie zu neuartigen Tanksystemen (Fraunhofer IPT)
- Teil I: Kurzbericht -**

Zuwendungsempfänger: Fraunhofer Institut für Produktionstechnologie IPT

Förderkennzeichen: 03ZU1115GB

Laufzeit des Vorhabens: 1. Oktober 2021 – 30. September 2024

Berichtszeitraum: 1.10.2021 – 30.09.2024 (Abschlussbericht Fraunhofer IPT)

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

1. Stand der Technik

Eine der grundlegenden Herausforderungen bei der wasserstoffbetriebenen Mobilität ist die Speicherung des Wasserstoffs, aufgrund seiner geringen volumetrischen Energiedichte. Derzeitiger Stand der Technik für mobile Anwendungen ist die Speicherung unter hohem Druck in kohlenstofffaserverstärkten Drucktanks des Typs IV. Bei diesem Typ wird eine Kunststoff Hülle, der sogenannte Liner, mit kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (CFK) umwickelt. Der Liner dient dabei als Permeationsbarriere während die aufgrund des hohen Innendrucks entstehenden mechanischen Lasten durch die CFK-Hülle getragen werden. Derzeit haben sich Druckniveaus von bis zu 350 bar für den Nutzlastverkehr und Busse, sowie bis zu 700 bar Arbeitsdruck für den PKW-Bereich etabliert. Aktuell wird dabei hauptsächlich ein duroplastischer faserverstärkter Kunststoff eingesetzt, beispielsweise eine Epoxidmatrix, und im Nasswickelverfahren auf den Liner gewickelt. In einem nachgelagerten Schritt werden die Tanks in einem Ofen oder Autoklaven ausgehärtet.

Nachteile an dem Nasswickelverfahren sind die eingeschränkte Designfreiheit im Ablegemuster aufgrund der Gefahr des Abrutschens der Faserbündel, sowie der Beschränkung auf die Wicklung kontinuierlicher Faserbündel. Dies resultiert neben teilweise mechanisch nicht optimiert abgelegten Faserbündeln in einer hohen Materialakkumulation im Dombereich und damit in einem erhöhten Materialverbrauch. Aufgrund der hohen Kosten für Kohlenstofffasern erhöhen sich somit die Kosten des Gesamtsystems Tank erheblich. Aktuell entfallen dabei ca. 70 % – 90 % der Gesamtkosten auf die Materialkosten. Ein weiterer Nachteil der duroplastischen Typ IV Drucktanks liegt in der eingeschränkten Recyclingfähigkeit begründet. Derzeit gängige Recyclingverfahren sind u. a. die thermische Verwertung durch Verbrennung oder mechanische Zerkleinerung und Rückgewinnung des Fasermaterials als Kurzfasern durch energieaufwändige Pyrolyse. Durch die Verwendung als Kurzfasern büßt das Fasermaterial jedoch einen Großteil seiner mechanischen Leistungsfähigkeit ein, sodass dieses Verfahren mehr einem Downcycling entspricht. Neben den materialabhängigen Aspekten besteht eine weitere Herausforderung der Drucktanks im Packaging. Die zylindrische Form von Drucktanks ist mechanisch sinnvoll, da sie den hohen Innendruck gleichmäßig verteilt und somit die strukturelle Integrität gewährleistet. Allerdings ist der verfügbare Platz im PKW oft begrenzt, was die Integration und Anordnung der Tanks im Fahrzeug erschwert.

Die hohen Materialkosten, offene Recyclingfragen sowie die Packaging-Probleme machen alternative Tanksysteme notwendig. Dazu soll eine wissenschaftliche Analyse und Bewertung verschiedener Tanksysteme hinsichtlich ihres Potenzials für verschiedene Anwendungen und Randbedingungen durchgeführt werden.

2. Wesentliche Projektergebnisse

Zunächst wurden alle möglichen Speicherlösungen in einer Longlist gesammelt und charakterisiert. Gleichzeitig erfolgt die Aufnahme verschiedener anwendungsabhängiger Anforderungen. Es wurden quantifizierbare Kriterien (KPIs, bspw.: Speicherdichte, Material- und Fertigungskosten) abgeleitet, anhand derer eine Auswahl (Shortlist) durchgeführt wurde. Dabei wurden sowohl evolutionäre Innovationen bestehender Technologien als auch disruptive Technologiesprünge mit geringerem TRL betrachtet (bspw. Kryo-Tanks für Nutzfahrzeuge, Metal-Hydride).

Kurz- bis mittelfristig wird wahrscheinlich vorrangig der Einsatz von state-of-the-art duroplastischen Typ-IV-Drucktanks erfolgen, da das Herstellungsverfahren ausgereift und bereits weit verbreitet im kommerziellen Einsatz ist. Allerdings sind aufgrund der beschriebenen Nachteile langfristig andere Optionen denkbar. Eine Möglichkeit stellt eine evolutionäre Innovation dar, wie die Verwendung eines thermoplastischen Matrixmaterials bei Typ-IV-Drucktanks. Diese Technik bietet eine höhere Recyclingfähigkeit, da das Matrixmaterial wieder aufgeschmolzen werden kann, und ermöglicht durch den Einsatz laserbasierter in-situ Konsolidierung eine höhere Designfreiheit. Hier bedarf es jedoch noch weiterer Forschungs- und Entwicklungsarbeit, um die Produktivität und den Durchsatz zu erhöhen.

Daneben ist die Speicherung in flüssiger Form bei kryogenen Temperaturen eine vielversprechende Option, die unter anderem von Daimler mit dem GenH2 Truck verfolgt wird. Der wesentliche Vorteil dieser Methode liegt in der erhöhten Energiedichte von $70,79 \text{ kg/m}^3$ im Vergleich zu 42 kg/m^3 bei Speicherung unter 700 bar. Allerdings erfordert die extrem niedrige Temperatur von $-253,15 \text{ °C}$, die zur Verflüssigung des Wasserstoffs nötig ist, eine aufwändige Isolierung. Der Wärmeeintrag aus der Umgebung führt hier zu Verdampfungsverlusten, die kontrolliert abgelassen werden müssen, um ein bestimmtes Druckniveau im Tanksystem nicht zu überschreiten (Boil-off-Verluste).

Durch die Kombination von kryogener und Hochdruckspeicherung, auch als kryo-komprimierte Speicherung bekannt, kann die Energiedichte weiter erhöht werden. Diese Technologie stellt jedoch das Tanksystem vor die Herausforderung, sowohl die kryogenen Temperaturen von etwa $-235,15 \text{ °C}$ als auch die hohen Drücke von etwa 300 bar tragen zu müssen.

Bei den beschriebenen Speichermethoden handelt es sich um physikalische Speichermethoden, bei denen Wasserstoff in Reinform gespeichert wird. Eine weitere Möglichkeit der Speicherung wären chemische Speichermethoden, wie Metallhydride oder Liquid Organic Hydrogen Carriers (LOHC). Allgemein zeigt sich jedoch, dass diese aufgrund des hohen notwendigen Energieeintrags zur Wasserstofffreisetzung, der langsamen Reaktionskinetiken und des hohen Gewichts, insbesondere bei Metallhydriden, momentan nur geringes Potenzial für mobile Anwendungen aufweisen.



**- Abschlussbericht zum Projekt HyInnoICE –
AP 5: Studie zu neuartigen Tanksystemen (Fraunhofer IPT)
- Teil II: Eingehende Darstellung -**

Zuwendungsempfänger: Fraunhofer Institut für Produktionstechnologie IPT

Förderkennzeichen: 03ZU1115GB

Laufzeit des Vorhabens: 1. Oktober 2021 – 30. September 2024

Berichtszeitraum: 1.10.2021 – 30.09.2024 (Abschlussbericht Fraunhofer IPT)

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis.....	iii
1. Eingehende Darstellung der Ergebnisse	4
2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	13
3. Angemessenheit und Notwendigkeit der geleisteten Aufwände.....	13
4. Nutzung und Verwertbarkeit der Ergebnisse	13
5. Fortschritt des Stands der Technik während der Projektlaufzeit	13
6. Veröffentlichung der Ergebnisse.....	13

Abkürzungsverzeichnis (Erweiterung)

IFG	Interdisziplinäre Forschergruppen
KPI	Key Performance Indicator
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle
TRL	Technology Readiness Level
LOHC	Liquid Organic Hydrogen Carriers
PEM	Protonen-Austausch-Membran
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell

1. Eingehende Darstellung der Ergebnisse

1.1. AP 5: Studie zu neuartigen Tanksystemen (Fraunhofer IPT)

Um die ambitionierten CO₂-Ziele in der Europäischen Union und in Deutschland zu erreichen, wird der Anteil erneuerbarer Energieträger im Verkehrssektor zukünftig steigen. Regenerativ hergestellter Wasserstoff (H₂) bietet ein großes Potential, CO₂-neutrale Lösungen für mobile Anwendungen im Straßenverkehr sowie für Off-Highway Anwendungen zu ermöglichen. Neben dem Einsatz in der Brennstoffzelle kann Wasserstoff auch für H₂-Motoren genutzt werden und damit auf der Nachfrageseite die weitere Markteinführung von H₂ als Energieträger für die Mobilität unterstützen.

Eine der grundlegenden Herausforderungen der wasserstoffbetriebenen Mobilität ist dabei die Speicherung des Wasserstoffs. Aufgrund seiner niedrigen volumetrischen Energiedichte wird der Wasserstoff nach aktuellem Stand der Technik unter hohem Druck bei 350 bar (Nutzfahrzeuge) und 700 bar (PKW) gespeichert. Aktuell kommen dazu in Brennstoffzellenfahrzeugen (FCEV) Typ IV Drucktanks zum Einsatz. Bei diesem Typ wird eine Kunststoff Hülle, der sogenannte Liner, mit kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (CFK) umwickelt. Der Liner dient dabei als Permeationsbarriere während die aufgrund des hohen Innendrucks entstehenden mechanischen Lasten durch die CFK-Hülle getragen werden. Die wesentlichen Zulassungskriterien sind in der UN R134 festgelegt. So ist bspw. ein Berstdruck vom 2,25-fachen des Arbeitsdrucks erforderlich, also bis zu 1575 bar. Aktuell wird dabei hauptsächlich ein duroplastischer faserverstärkter Kunststoff eingesetzt, beispielsweise eine Epoxidmatrix, und im Nasswickelverfahren auf den Liner gewickelt. In einem nachgelagerten Schritt werden die Tanks in einem Ofen oder Autoklaven ausgehärtet.

Bei dem Nasswickelverfahren werden Faserbündel, sogenannte Faserrovings, unmittelbar vor dem Ablegen mit dem Matrixmaterial, bspw, einem Epoxidharz, imprägniert, anschließend durch das sogenannte Fadenauge geführt und der Liner damit umwickelt (Siehe Abbildung 1). In einem nachgelagerten Schritt werden die Tanks in einem Ofen oder Autoklaven ausgehärtet. Vorteil der Technologie ist die hohe Fertigungsgeschwindigkeit sowie die Möglichkeit das Faser- und Matrixmaterial getrennt voneinander zu lagern und auszuwählen. Somit lässt sich die möglichst kostengünstigste Materialkombination auswählen.

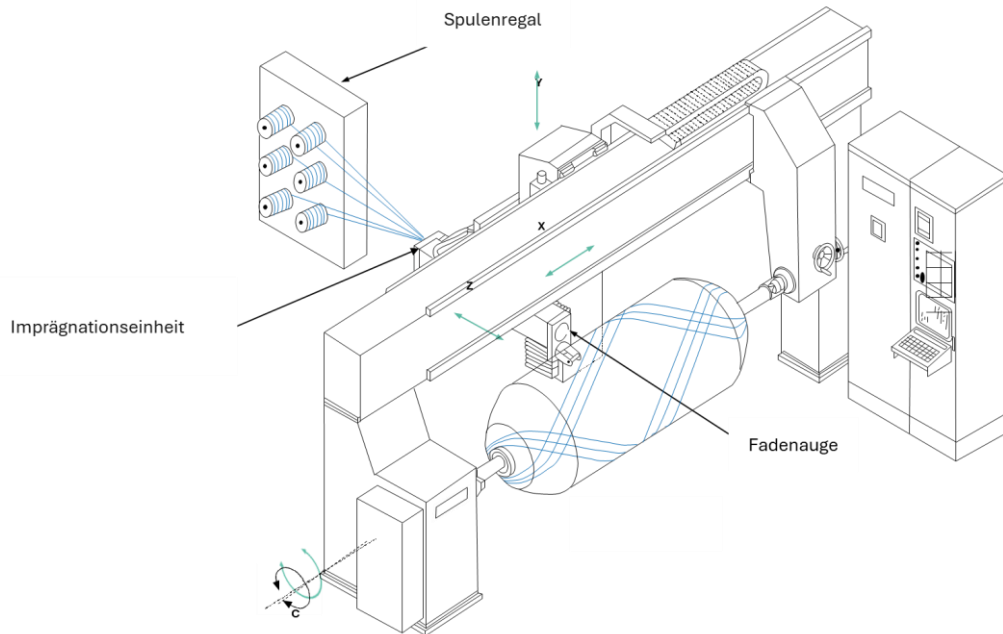


Abbildung 1: Prinzipskizze des Nasswickelverfahrens.

Nachteile an dem Nasswickelverfahren sind die eingeschränkte Designfreiheit im Ablegemuster aufgrund der Gefahr des Abrutschens der Faserbündels, sowie der Beschränkung auf die Wicklung kontinuierlicher Faserbündel. (Siehe Abbildung 2) Dies resultiert neben teilweise mechanisch nicht optimiert abgelegten Faserbündeln in einer hohen Materialakkumulation im Dombereich und damit in einem erhöhten Materialverbrauch. Aufgrund der hohen Kosten für Kohlenstofffasern erhöhen sich somit die Kosten des Gesamtsystems Tank erheblich. Aktuell entfallen ca. 70 % – 90 % der Gesamtkosten auf die Materialkosten.

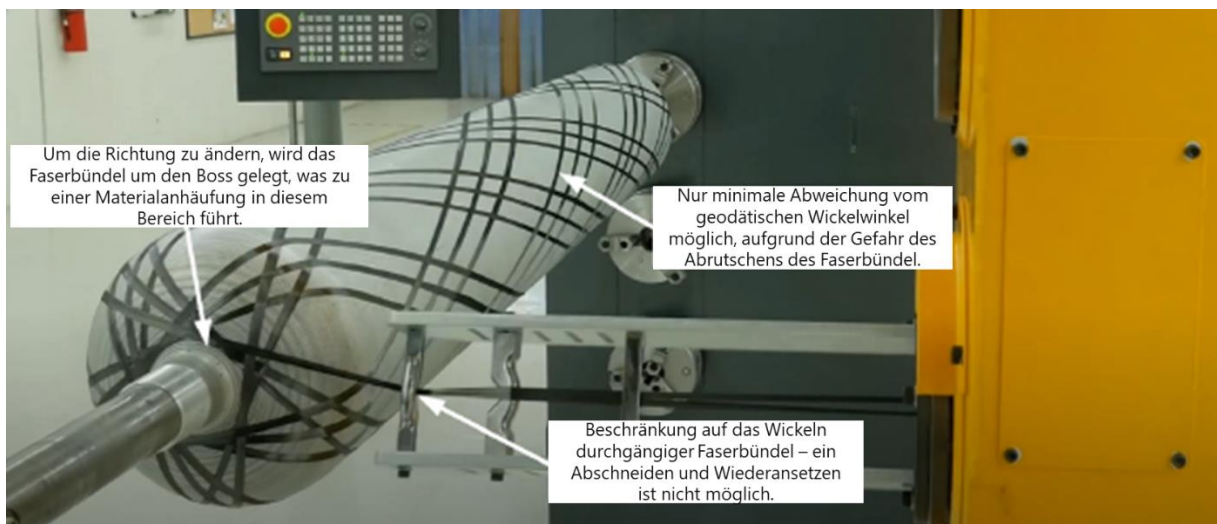


Abbildung 2: Einschränkungen des Nasswickelverfahrens duroplastischer Drucktanks.

Ein weiterer Nachteil der duroplastischen Typ IV Drucktanks liegt in der eingeschränkten Recyclingfähigkeit begründet. Derzeit gängige Recyclingverfahren sind u. a. die thermische Verwertung durch Verbrennung oder mechanische Zerkleinerung und Rückgewinnung des

Fasermaterials als Kurzfasern durch energieaufwändige Pyrolyse. Durch die Verwendung als Kurfasern büßt das Fasermaterial jedoch einen Großteil seiner mechanischen Leistungsfähigkeit ein, sodass dieses Verfahren einem Downcycling entspricht. Neben den materialabhängigen Aspekten besteht eine weitere Herausforderung der Drucktanks im Packaging. Die zylindrische Form von Drucktanks ist mechanisch sinnvoll, da sie den hohen Innendruck gleichmäßig verteilt und somit die strukturelle Integrität gewährleistet. Allerdings ist der verfügbare Platz im PKW oft begrenzt, was die Integration und Anordnung der Tanks im Fahrzeug erschwert.

Nach der Betrachtung des Stands der Technik wurde im nächsten Schritt eine Liste von Key Performance Indicators (KPIs) aufgestellt, anhand derer aus einer parallel zusammengestellten Longlist von Speichertechnologien eine Shortlist erstellt wurde. Der duroplastische Typ IV Drucktank diente dabei ebenfalls als Benchmark. Eine vollständige Übersicht der KPIs ist in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1: Liste der Key Performance Indicator (KPIs)

Nr.	Kategorie	KPI	Beschreibung
1.	Kompatibilität des Speichersystems mit dem Fahrzeug	Volumetrische Speicherdichte	Gespeicherte Energie in Bezug auf das Volumen der Speichertechnik. Einheit kWh/L.
2.		Gravimetrische Speicherdichte	Gespeicherte Energie in Bezug auf das Gewicht der Speichertechnik. Angegeben in wt% (Anteil des Wasserstoffs am Gesamtgewicht).
3.		Be- und Entladungsrate	Die Rate, mit der die Speichertechnik mit dem Wasserstoff be- und entladen werden kann. Einheit kg/sec
4.		Leistungsrate	Die Rate, in der der Wasserstoff aus der Speichertechnologie dem System zugeführt werden kann.
5.		Wirkungsgrad	Anteil der Energie, die nutzbar bleibt, d.h. Energieverluste durch die Speicherung, z. B. Kompression, Kühlung, etc., werden dargestellt.
6.		Wasserstoffverluste	Verlust von Wasserstoff über Zeit, z. B. durch Permeation oder Abdampfen.
7.		Wartungsaufwand	Während des Betriebs auftretender Wartungsaufwand und damit auftretender Kostenfaktor.
8.		Packing-Kompatibilität	Möglichkeit die Speichertechnologie bauraumoptimiert im Fahrzeug zu integrieren.
9.		Gewicht der Speichertechnologie	Gewicht der Speichertechnologie.

10.	Komplexität der benötigten Infrastruktur	Komplexität und Ausmaß der Infrastruktur	Betrachtung der benötigten Infrastruktur für den Einsatz der einzelnen Speichertechnik. Bspw. benötigte Infrastruktur zur Komprimierung oder Verflüssigung von Wasserstoff.
11.		TRL der Infrastruktur	Betrachtung der technologischen Einsatzreife der Infrastruktur.
12.	Kosten und Nachhaltigkeit des Speichersystems	Materialkosten	Materialkosten die für die einzelnen Speichertechnologien anfallen unabhängig von sonstiger Infrastruktur. Bspw. Kosten für Faserverbundmaterialien für die Typ 3-5 Tanks als großer Kostenfaktor.
13.		Herstellungskosten ohne Materialkosten	Herstellungskosten der Speichertechnik ohne Betrachtung der Materialkosten. Bspw. Energiekosten in der Herstellung.
14.		Betriebskosten	Anfallende Betriebskosten der Speichertechnologie in der Nutzungsdauer. Bspw. Instandsetzungsmaßnahmen.
15.	Investitionskosten und Risiko für den Markteintritt der Produktion	Investitionskosten für die Herstellungsanlagen	Kosten, die für Beschaffung und Aufbau der Herstellungsanlagen anfallen.
16.		TRL* des Speichersystems	Betrachtung der technologischen Einsatzreife und Marktreife des Speichersystems.
17.		TRL* der Produktionstechnologie	Betrachtung der technologischen Einsatzreife der Produktionstechnologie.
18.		Verfügbarkeit der Materialien, Robustheit und Skalierbarkeit der Lieferketten	Untersuchung der Materialverfügbarkeit und Risikobewertung der Lieferketten. sowohl gegenwärtig als auch für die Zukunft.
19.	Nachhaltigkeit der Speichertechnologie	Nachhaltigkeit der Produktionskette	Auswirkungen der Produktion der einzelnen Speichertechnologien auf die Umwelt. Bspw. anfallende Emissionen, Verbrauch von natürlichen Ressourcen usw.
20.		Nachhaltigkeit des Betriebs	Auswirkungen des Betriebs der Speichertechnologie auf die Umwelt.
21.		End-of-Life Verwertung	Möglichkeit zum Recycling
22.		Umweltverträglichkeit	Potenzieller Umweltschaden, der durch die Speichermethoden entstehen kann

Die KPIs wurden in einer Bewertungsmatrix zusammengefasst und gewichtet (Siehe Abbildung 3). Als Orientierungsgrößen für die Bewertung dienen Daten des Typ IV Duroplasttanks. Die Bewertung der Speichertechnologien sollte möglichst quantifizierbar durchgeführt werden. Bei einigen Speichertechnologien musste jedoch aufgrund fehlender Quantifizierbarkeit oder fehlender Informationen bezüglich der KPIs auf eine qualitative Bewertung zurückgegriffen werden. Dies gilt insbesondere für die innovativen und hypothetischen Speichertechnologien, für die es teilweise noch keine quantitativen Ergebnisse gibt.

Quantifizierbar	Volumetrische Speicherdichte [kg/m ³]	< 30	30 - 40	> 40
	Gravimetrische Speicherdichte [wt%]	< 4	4 - 5.7	> 5.7
	Beladungsrate [g/s]	< 1	1 - 1.67	> 1.67
	Feed rate [g/s]	< 1,5	1,5 - 2	> 2
	Gewicht [kg]	> 100	50 - 100	0 - 50
	Wasserstoffverluste	Hoch (komplexe Peripherie nötig)	Mittel	Vernachlässigbar
	Wirkungsgrad	0 - 50	50 - 80	> 80
	Kosten/kg H ₂ [€/kg H ₂]	800	400 - 800	< 400
	TRL der Speichertechnologie	1 - 3	4 - 7	8 - 9
	Infrastruktur	Hoher Aufwand nötig	Mittlerer Aufwand nötig	Geringer Aufwand (Verwendung bestehender Infrastruktur)
	Packing Kompatibilität	Gering (Geometrie stellt Herausforderung für Integration dar)	Mittel	Hoch (Geometrie nutzt vorhandenen Bauraum gut aus)
	Nachhaltigkeit durch Recycling	Geringe Recyclingfähigkeit	Mittlere Recyclingfähigkeit	Hohe Recyclingfähigkeit

Abbildung 3: Bewertungsmatrix auf Basis der KPIs.

Die Longlist der Speichertechnologien gliedert sich grundsätzlich in physikalische und chemische Speichermethoden. Eine Übersicht ist in der folgenden Tabelle dargestellt:

Tabelle 2: Longlist der Speichertechnologien

Nr.	Kategorie	Speichertechnologie	Kurze Beschreibung	
1.	Physikalische Speicherung	Konventionelle (zylindrische) Tankgeometrie	Typ 1 Drucktank	Drucktank vollständig aus einer metallischen Hülle.
2.			Typ 2 Drucktank	Drucktank aus einer metallischen Hülle, die in zylindrischen Teil mit einem Faserverbundmaterial umwickelt wird. Die Umwicklung bewirkt eine mechanische Verstärkung, so dass die Wandstärke der metallischen Hülle im Gegensatz zu dem Typ 1 verringert werden kann.
3.			Typ 3 Drucktank mit duroplastischer Matrix	Drucktank bestehend aus einem Metallliner umwickelt mit einem Carbonfaser-Duroplast-Verbund.
4.			Typ 3 Drucktank mit thermoplastischer Matrix	Drucktank bestehend aus einem Metallliner umwickelt mit einem Carbonfaser-Thermoplast-Verbund.
5.			Typ 4 Drucktank mit duroplastischer Matrix	Drucktank bestehend aus einem Polymerliner umwickelt mit einer Carbonfaser-Duroplast-Verbund.
6.			Typ 4 Drucktank mit thermoplastischer Matrix	Drucktank bestehend aus einem Metallliner umwickelt mit einer Carbonfaser-Thermoplast-Verbund.
7.			Typ 5 Drucktank	Drucktank gewickelt aus einer Carbonfaser-Thermoplast-Verbund ohne Liner.

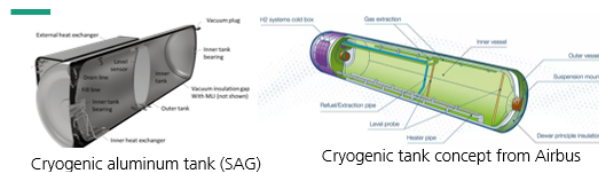
8.			Flüssiger (kryogener) Wasserstoff	Flüssiger Wasserstoff, der bei -253°C in einem isolierten Tank gespeichert wird. Wie bei der Druckspeicherung werden auch bei der Flüssigwasserstoffspeicherung die Tanktypen 1 bis 5 unterschieden.
9.		Unkonventionelle Tankgeometrie		Da ein Zylinder aus Packing Sicht ungünstig ist, gibt es vermehrt Anstrengungen zur Realisierung unkonventioneller, zum Beispiel quaderförmiger, Tankgeometrien. Aus Gewichtsgründen wird auch hier die Verwendung von Faserverbundmaterialien angestrebt, jedoch unterscheidet sich die Konstruktion einer derartigen Tankform nach bisherigen Ansätzen deutlich von den vorher aufgeführten Typen 1 bis 5.
10.		Kryo-komprimierter Wasserstoff		Kombination der Hochdruckspeicherung und Flüssigspeicherung. Der Wasserstoff wird oberhalb der kritischen Temperatur (33 K) und dem kritischen Druck (13 bar) bei 300 bis 1000 bar als überkritisches Fluid gespeichert.
11.	Chemische Speicherung	Metallhydrid	Einfaches	Wasserstoff wird chemisch an ein Metall oder eine Metalllegierung gebunden. Einfache Metallhydride sind simple Moleküle z. B.: MgH_2
12.			Komplexes	Wasserstoff wird chemisch an ein Metall oder eine Metalllegierung gebunden. Komplexe Metallhydride sind schwerer herzustellen, haben dafür eine höhere Wasserstoffkapazität, z. B. $LiBH_4$
13.	LOHC (Liquid Organic hydrogen Carrier)	Trägeröle	Toluol/Methyl Cyclohexan	LOHC sind organische Verbindungen, die durch chemische Reaktionen Wasserstoff absorbieren und abgeben können. Aufgrund der kovalenten Bindung ist die Speicherung nahezu verlustfrei. Die Dehydrierung, also die Wasserstoffabgabe, findet ab 260 °C statt. Die dargestellten Trägeröle sind eine Auswahl für mögliche LOHC-Materialien.
14.			Benzyltoluol	
15.			Dibenzyltoluol	
16.			N-Ethylcarbazol	
17.		Ammoniak		Verbindung von Wasserstoff und Stickstoff zu Ammoniak. Neben dem bekannten Haber-Bosch-Verfahren wird an neuartigen Power-to-Ammonia-(PtA) Prozessen gearbeitet, u. a. vom Fraunhofer ISE. Durch die Umwandlung in Ammoniak lässt sich die im Wasserstoff gespeicherte Energie in flüssiger Form mittels Pipelines oder Schiff transportieren.

18.		Adsorption metallorganische Gerüste (MOF)	Physikalische Bindung von Wasserstoff an der Oberfläche von porösen Metallmolekülen
19.		Adsorption Kohlenstoffnanoröhren	Physikalische Bindung von Wasserstoff an der Oberfläche von Kohlenstoffnanoröhren

Anhand der Bewertungsmatrix wurden diese Speichertechnologien einzeln bewertet und eine Shortlist der vielversprechendsten Speichertechnologien erstellt. Beispielhaft ist die Bewertung für die Speicherung unter kryogenen Bedingungen in Abbildung 4 dargestellt:

Speicherung unter kryogenen Bedingungen

Physikalische Speichermethoden



Cryogenic aluminum tank (SAG)

Cryogenic tank concept from Airbus

Bewertung

Volumetrische Speicherdichte [kg/m ³]:	70.79	●●●●●
Gravimetrische Speicherdichte [wt%]:	5.5	●●●●●
Beladungsrate [g/s]:	27.8	●●●●●
Feed Rate [g/s]:	1.5 - 2	●●●●●
Gewicht [kg]:	-	●●●●●
Wasserstoffverluste [% pro Tag]:	2-3	●●●●●
Wirkungsgrad:	70-75	●●●●●
Kosten/kg H ₂ [€/kg H ₂]:	-	●●●●●
TRL der Speichertechnologie:	6	●●●●●
Benötigte Infrastruktur:	-	●●●●●
Packing Kompatibilität:	-	●●●●●
Nachhaltigkeit der Technologie:	-	●●●●●

Beschreibung

- Zur Verflüssigung muss der Wasserstoff auf -253°C abgekühlt werden
- Ausreichende Isolierung und je nach Anwendungsfall ein aktives Kühlsystem erforderlich

Vorteile/Nachteile

- + Hohe Energiedichte
- Aufwendige Isolierung notwendig
- "Boil-off"-Verluste sind nicht vollständig vermeidbar
- Temperaturen sind eine Herausforderung für das Tankmaterial
- Energieaufwand für Verflüssigung beträgt ca. 25% des im Wasserstoff enthaltenen Energiegehalts
- Noch keine Infrastruktur

Abbildung 4: Steckbriefartige Bewertung der kryogenen Speicherart.

Der Typ IV Duroplasttank für gasförmigen Wasserstoff stellt wie oben erwähnt den derzeitigen Stand der Technik für mobile Anwendungen dar, wird bereits in größeren Stückzahlen hergestellt und kommt ebenfalls in den einzigen derzeit in Serie gebauten Wasserstoff Fahrzeugen Toyota Mirai und Hyundai Nexa zum Einsatz.

Aufgrund der besseren Recyclingfähigkeit und größeren Gestaltungsfreiheit der Geometrie gibt es vermehrte Forschungs- und Entwicklungsarbeiten im Bereich der Drucktanks mit thermoplastischer Matrix. Durch die In-Situ-Konsolidierung mittels einer Heizquelle, beispielsweise eines Lasers, sind höhere Gestaltungsfreiheiten beim Composite Lagenaufbau möglich als dies beim klassischen Nasswickelverfahren der Fall ist. Die somit möglichen alternativen Wickelstrategien erlauben potenziell eine Material- und damit Kostenersparnis. Ein weiteres wesentliches Potential des thermoplastischen Typ IV Tanks ist das erhöhte Recyclingpotential gegenüber dem Duroplasttank. Durch lokales Aufschmelzen des Matrixmaterials und „Abziehen“ lassen sich thermoplastische Tapebahnen vollständig zurückgewinnen und wiederverwenden. Ein solcher Prozess ist vom Fraunhofer IPT bereits patentiert. Den Vorteilen stehen jedoch die derzeit höheren Materialkosten sowie langsamere

Prozesszeiten gegenüber. Derzeit ist der thermoplastische Typ IV Tank Gegenteil von Forschung und Entwicklung und wird noch nicht kommerziell eingesetzt.

Neben der Betrachtung des Materialaspektes widmen sich weitere Forschungsarbeiten der Geometrie des Tanks. Speziell im Automobilssektor ist die Packing-Kompatibilität ein wichtiges Kriterium. Die bisher eingesetzten zylindrischen Tanks benötigen viel Platz, was zulasten des verfügbaren Stauraums und der Fahrdynamik geht. In dem vom Bundeswirtschaftsministerium geförderten Forschungsprojekt Bryson wird unter Leitung von BMW und Beteiligung der TU München ein quaderförmiger 700 bar Hochdrucktank erforscht. Durch die Quaderform soll, analog zu Batteriespeichern, eine Integration des Tanksystems in die Unterbodenstruktur eines Fahrzeugs ermöglicht werden. Den Packaging Vorteilen dieser Technologie stehen jedoch große Herausforderungen bei der Aufnahme zusätzlicher Biegebelastungen durch die nicht zylindrische Form gegenüber. Um dem zu begegnen sind in dem Tank Streben vorgesehen, die durch die Tankwand hindurch gehen (Siehe Abbildung 5). Dies birgt wiederum die Herausforderung diese Durchbruchstellen abzudichten.

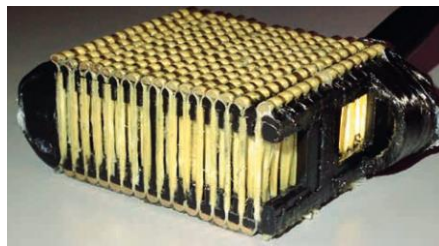


Abbildung 5: Entwicklung eines quaderförmigen Hochdrucktanks im Rahmen des Projekts Bryson (U. a. BMW, Hochschule München)

Um sich die Vorteile der erhöhten volumetrischen Energiedichte von verflüssigtem Wasserstoff zu eigen zu machen gibt es außerdem verschiedene Entwicklungsarbeiten im Bereich der Kryospeicherung von Wasserstoff. Beispielsweise erforscht Daimler Truck in seinem neuesten Wasserstoff Prototypenfahrzeug die Speicherung in flüssiger Form, um sich damit im Fernverkehrssektor zu platzieren. In der Luftfahrt geht die Entwicklung bei größeren Passagiermaschinen ebenfalls in Richtung der Flüssigwasserstoffspeicherung. So beabsichtigt Airbus in seinem ZEROe Konzept den Einsatz der Kryospeicherung des Wasserstoffes. Herausforderungen bestehen hier unter anderem in der Isolation des Tanks, um Wasserstoffverluste durch den Boil-Off Effekt zu minimieren. Damit der Wasserstoff in die flüssige Phase übergeht, muss er auf -253 °C abgekühlt werden, was mit einem hohen Energieaufwand einhergeht.

Eine weitere physikalische Speichermethode ist die Kombination der Hochdruck- sowie Kryospeicherung, der sogenannten kryo-komprimierten Speicherung. Hier wird der Wasserstoff oberhalb der kritischen Temperatur $T_{crit} = 33K (= -240,15\text{ °C})$ und dem kritischen Druck $p_{crit} = 13\text{bar}$ bei 300 bis 1000 bar als überkritisches Fluid gespeichert. Das Unternehmen Cryomotive gibt beispielsweise an, Wasserstoff bei 350 bar und -207,15 °C

einzuspeichern. Ähnlich wie ein Kryotank für die Flüssigwasserstoffspeicherung besteht der kryo-komprimierte Drucktank aus einer inneren und äußeren Hülle mit einem zur Isolierung dienenden Vakuum dazwischen. Da bei der kryo-komprimierten Speicherung hohe Drücke vorliegen, besteht die innere Hülle aus einem Typ III Drucktank, bei dem eine metallische Hülle mit Kohlenstofffaser verstärktem Kunststoff (CFK) umwickelt wird. Vorteile dieser Speichermethode liegen in einer erhöhten Speicherdichte, sowie reduzierten Boil-Off Verlusten verglichen mit der flüssigen Kryospeicherung. Allerdings stellen auch bei der kryo-komprimierten Speichermethode Boil-Off Verluste eine Herausforderung dar und machen eine aufwändige Isolierung notwendig. Ein weiterer negativer Aspekt sind die hohen Kosten für die CFK-Umwicklung.

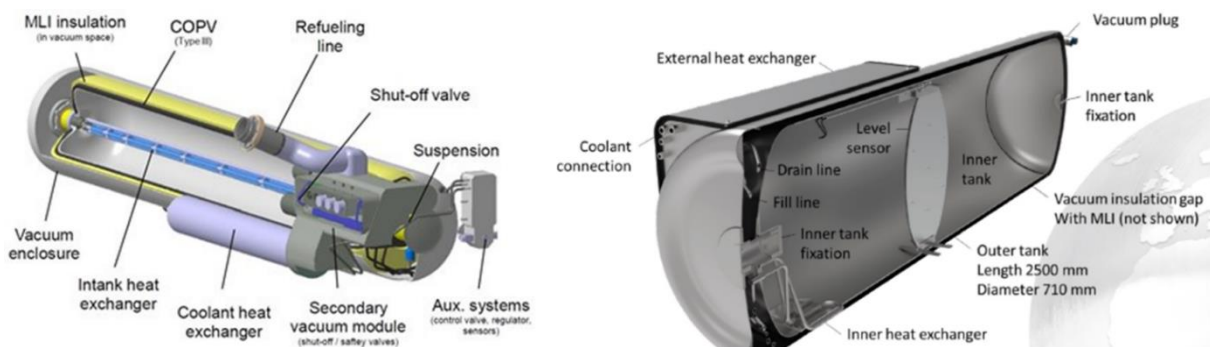


Abbildung 6: Kryo-komprimierter Wasserstofftank (links; Quelle: BMW) und flüssiger Kryowasserstofftank (rechts; Quelle: SAG)

Neben den physikalischen Speichermethoden wurden die chemischen Speichermethoden, hauptsächlich in Form der Metallhydride und flüssiger organischer Wasserstoffträger (LOHC) betrachtet.

Metallhydride besitzen den Vorteil hoher volumetrischer Energiedichten, sowie die Möglichkeit zur langfristigen Speicherung des Wasserstoffes bei niedrigen Drücken. Ähnliches gilt für die flüssigen organischen Wasserstoffträger. Diese können den Wasserstoff beim Umgebungsbedingungen einspeichern, was eine langfristige Speicherung und einfache Handhabung ermöglicht. Somit könnten LOHCs wie herkömmliche Treibstoffe gelagert und getankt werden, was eine teilweise Weiterverwendung der bestehenden Infrastruktur erlauben würde. Bei beiden Speichermethoden stellt jedoch die für mobile Anwendungen zu langsame Reaktionskinetik und damit die ausreichende Versorgung eines Verbrauchers mit Wasserstoff die größte Herausforderung dar. Eine ausreichende Menge Wasserstoff in der nötigen Zeit auszulösen ist derzeit Thema von Forschung und Entwicklung.

Um den Wasserstoff aus dem Speichermedium LOHC auszulösen sind hohe Temperaturen nötig. Die Abwärme einer Proton-Austausch-Membran (PEM)-Brennstoffzelle, wie sie derzeit typischerweise für Brennstoffzellenfahrzeuge eingesetzt wird, sind dafür nicht ausreichend. Hier könnte die Kombination mit einem Wasserstoff Verbrennungsmotors oder einer Hochtemperatur-Brennstoffzelle einen entscheidenden Vorteil bringen, da diese eine höhere

Abwärme zur Verfügung stellen. So wird unter anderem am Helmholtz Institut Erlangen-Nürnberg an der Kopplung einer Festoxidbrennstoffzelle (SOFC) mit der LOHC-Speichertechnologie geforscht, mit dem Ziel die Abwärme der SOFC in die LOHC-Dehydrierung einzubinden und damit die benötigte Reaktionsenthalpie bereitzustellen.

In der kurz- bis mittelfristigen Zukunft werden voraussichtlich weiterhin die „klassischen“ duroplastischen Typ IV Drucktanks zum Einsatz kommen. Aufgrund der dargestellten Nachteile ist für Drucktanks langfristig der Einsatz von thermoplastischen Matrixmaterialien denkbar, bedarf allerdings weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeit. Die Speicherung unter kryogenen Bedingungen ist eine weitere, aufgrund der erhöhten Energiedichte speziell für den Schwerlastverkehr vorteilhafte Möglichkeit der Speicherung, birgt aber große Herausforderungen hinsichtlich der boil-off Verluste und hat den Nachteil des erhöhten Energiebedarfs zur Verflüssigung. Eine Speicherung in chemisch gebundener Form ist für mobile Anwendungen derzeit nicht absehbar.

2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Gemäß zahlenmäßigen Verwendungsnachweis sind Personalkosten (Position 0837) in Höhe von 102.713,58 € abgerechnet.

3. Angemessenheit und Notwendigkeit der geleisteten Aufwände

Die zur Erzielung der Projektergebnisse geleisteten Aufwände waren notwendig und angemessen.

4. Nutzung und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Innerhalb dieser Studie wurden neuartige Tankkonzepte ausgearbeitet und bewertet, sodass damit eine Grundlage für die Umsetzung in weiteren, zukünftigen Phasen des Zukunftsclusters sowie auch in anderen Forschungsvorhaben geschaffen wurde.

Es konnten die Chancen und Risiken alternativer Tanksysteme herausgearbeitet werden und eine Entscheidungsgrundlage für weitere Entwicklungsarbeiten geschaffen werden. Durch eine detaillierte Betrachtung einzelner Systeme wurde der Forschungs- und Entwicklungsbedarf herausgestellt, sodass in zukünftigen Projekten daran angeknüpft werden kann, um ein optimiertes Tanksystem in die Tat um zu setzen.

5. Fortschritt des Stands der Technik während der Projektlaufzeit

Es ist kein Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bekannt geworden.

6. Veröffentlichung der Ergebnisse

Es sind keine Veröffentlichungen im Rahmen des Projektes erfolgt oder zukünftig geplant.