



Machbarkeitsstudie

Wasserstoff und Speicherung im Schwerlastverkehr

Wolfgang Art

Förderkennzeichen 03B 108001/LOHC
Projektlaufzeit 1. Januar 2017 – 31. Juli 2017

Erlangen, 31. Juli 2017

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Arlt
Lehrstuhl für Thermische Verfahrenstechnik
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Egerlandstraße 3
91058 Erlangen
Tel: +49 9131 / 85 27 440

E-Mail: wolfgang.arlt@fau.de

An der Ausarbeitung dieser Studie haben mitgewirkt:

Dipl.-Ing. Jonas Obermeier, FAU (Schriftleitung);
Kerstin Schuster, B.Sc.; Lutz Oberle, B.Sc.; Dipl.-Ing. Christoph Krieger; Dr. Karsten Müller; Dr. Martin Schneider;
Dr. Berthold Melcher; Dipl.-Ing. Christoph Müller Philipps Sohn; Dipl. Ing. Moritz Schumacher;
Prof. Michael Wensing; Prof. Peter Wasserscheid

KURZFASSUNG

Die BMVI-Studie „Erneuerbare Energien im Verkehr - Potenziale und Entwicklungsperspektiven verschiedener erneuerbarer Energieträger und Energieverbrauch der Verkehrsträger“ gibt auch für diese Machbarkeitsstudie das Ziel vor: „Die Bundesregierung hat sich mit dem Energiekonzept und dem Ausstieg aus der Kernenergie ambitionierte Ziele für die zukünftige Energieversorgung in Deutschland gesetzt. Die Umsetzung dieser Ziele wird auch als „Energiewende“ bezeichnet und stellt ein langfristiges politisches, wirtschaftliches und gesellschaftliches Großprojekt für Deutschland dar. Die Zielerreichung wird dabei vor allem an der Reduktion von Energieverbrauch und CO₂-Emissionen und dem Anteil erneuerbarer Energien am Energieverbrauch gemessen.“

Diese Machbarkeitsstudie zeigt Wege auf, wie der Schwerlastverkehr CO₂-frei gestaltet werden kann. Die Energiequelle ist dabei Wasserstoff, nicht jedoch als Gas, sondern in energiedichter, chemisch gebundener, bei Umgebungsbedingungen flüssiger Form (LOHC), so dass Änderungen an der Infrastruktur der Tankstellen marginal sein werden. LOHC kann man dann tanken wie Diesel.

Das Ergebnis beinhaltet zwei Wege den Wasserstoff an Bord eines LKW energetisch zu nutzen: einer führt über den Verbrennungsmotor, der andere über eine Brennstoffzelle. Beide Wege werden extrem emissionsarm („zero emission“) sein. Der Weg über den Verbrennungsmotor nutzt die lange Erfahrung der deutschen Automobilindustrie auf diesem Gebiet. Als Seiteneffekt hat sich eine Abgasreinigung für Stickoxide ergeben, die auch für die heutigen PKW nutzbar wäre. Beide Wege haben ihre spezifischen Vor- und Nachteile. Im Kontext mit der LOHC-Technik hat der Verbrennungsmotor größere Vorteile.

Die Studie prüft auch, ob eine regenerative Energieversorgung möglich sein wird. Der Wasserstoff kann klimafreundlich aus Elektrizität aus regenerativen Anlagen gewonnen werden. Sollte der gesamte Schwerlastverkehr auf den vorgeschlagenen Prinzipien basieren, ist ein weiterer und beschleunigter Ausbau der Gewinnung regenerativer Energie notwendig. Allerdings kann die Wasserstoff-beladene LOHC-Flüssigkeit auch importiert werden, z.B. aus Nord-Afrika, Island oder Kanada. Auf diese Weise können die weltweit günstigsten Standorte für die Erzeugung regenerativer Energie für die emissionsfreie Mobilität in Deutschland genutzt werden.

Der nächste Schritt muss die Fertigung eines Prototypen LKW sein, der dann auf der Straße getestet wird. Wie bei jeder neuen Technologie müssen gesetzliche Regeln verändert werden. Eine neue Technologie ist oft teurer als eine etablierte. Daher muss in der Startphase ein Anreizsystem geschaffen werden, damit die knappen Margen des Transportgewerbes nicht reduziert werden. Ein Weg wäre die Minderung der Maut für CO₂-freie LKW zur Not bis auf Null.

Inhaltsverzeichnis

1	Handlungsbedarf	1
2	Der Schwerlastverkehr - Herausforderung und Chancen	5
2.1	Straßengebundener Gütertransport	5
2.2	Status quo: Zusammensetzung des Nutzfahrzeugbestands	6
2.3	Fahrprofile setzen Randbedingungen für alternative Kraftstoffe	8
2.4	Herausforderung Güterfernverkehr: Energiespeicherdichte und Leistungsbedarf	10
2.5	Energiebedarf Verkehrssektor vs. regenerative Energiequellen	11
3	Warum Wasserstoff als Kraftstoff?	13
3.1	Ökonomischer Vergleich: stoffliche Gegenüberstellung	13
3.2	Energetischer Vergleich: stoffliche Gegenüberstellung	16
3.3	Speicherung von Wasserstoff: die Herausforderung	19
4	LOHC - was ist darunter zu verstehen?	23
4.1	Grundkonzept	23
4.2	Entwicklungsschritte einer alten Idee	25
4.3	Favorisiertes Stoffsystem	26
4.3.1	Reaktionsbedingungen	26
4.3.2	Reaktor und Katalysator	27
4.3.3	Stoffdaten	28
4.3.4	Bereitstellung der Dehydrierwärme – Auswirkung auf Speicherdichte und Wirkungsgrad	30
4.3.5	Wasserstoffreinheit	31
4.3.6	Transport, Lagerung und Handling	32
4.4	LOHC oder Druckwasserstoff: ein vorgezogenes Fazit	33
5	Wie sieht ein LOHC-basierter Antriebsstrang aus?	37
5.1	Grundkonzept der on-board H ₂ -Freisetzung	37
5.1.1	Kurzbeschreibung der grundlegenden Komponenten	38
5.1.2	Anforderungen an den Antriebsstrang	40
5.2	Szenarien der on-board H ₂ -Freisetzung	42
5.2.1	LOHC und H ₂ -Verbrennungsmotor	42
5.2.2	LOHC und Brennstoffzelle	47
5.2.3	Diskussion und Vergleich mit Druckwasserstoff	51
6	Wie sieht die LOHC-Infrastruktur aus?	55
6.1	Szenarien einer LOHC-Infrastruktur	56
6.2	LOHC – ein Kraftstoffkreislauf mit Pfand	58
6.3	Teilkomponenten der LOHC-Infrastruktur	59
6.4	Gesetzliche Rahmenbedingungen	60
6.5	Energie- und Leistungsbilanzierung einer Tankstelle	61
7	Wo wir stehen & was muss getan werden	65
7.1	Fahrzeugseitige Komponenten	65
7.2	Infrastruktur	72
7.3	Gesetzliche Regelungen	76
8	Abschließender Systemvergleich	79
9	LOHC im Schwerlastverkehr – ein Konzept mit großem Potenzial	87
	Anhang	89
	Kontakte im Rahmen dieses Projektes	92
	Tabellenverzeichnis	94
	Abbildungsverzeichnis	95
	Literaturverzeichnis	96

1 Handlungsbedarf

Im Jahr 2014 betrug der Endenergiebedarf der Bundesrepublik Deutschland knapp 2.500 TWh. Davon entfielen circa 29,5 % auf den Verkehrssektor. Während der Industrie-, Haushalts- und Gewerbesektor seit 1990 ihren Energiebedarf teils deutlich senken konnten, verzeichnete der Verkehrssektor in dieser Zeitspanne einen Anstieg von 660 TWh auf 728 TWh [1]. Im Klimaschutzplan 2050 der Bundesregierung [2] werden der Energieverbrauch¹ und die zulässigen Treibhausgasemissionen der einzelnen Sektoren für das Jahr 2030 festgelegt. Im Falle des Verkehrssektors liegt dieser Zielwert bei 95 bis 98 Mio. t_{CO₂-Äq.}/a. pro Jahr. Im Jahr 1990 betrug der Ausstoß, gemessen in CO₂-Äquivalenten, 163 Mio. t_{CO₂-Äq.}/a. Laut Bundesregierung soll demnach eine Reduzierung um 40 % bzw. 42 % erfolgen (bezogen auf das Jahr 1990). Basierend auf der Tatsache, dass die Gesamtemissionen der Bundesrepublik Deutschland zwischen 1990 und 2014 um ca. 28 % gesunken sind, sieht das positiv aus. Bei einer detaillierten Betrachtung der Sektoren ist jedoch festzustellen, dass insbesondere im Verkehrssektor kein signifikanter Fortschritt zu verzeichnen ist: Die jährlichen Emissionen sind im betrachteten Zeitraum lediglich um weniger als 1,8 % gesunken (2014: 160 Mio. t_{CO₂-Äq.}/a). Dies ist umso wichtiger, da die Emissionen des Verkehrssektors knapp 18 % der deutschen Gesamtemissionen ausmachen. Gleichzeitig zeigt es, dass im Bereich der Energiewirtschaft, der Gebäude und der Industrie stetige Einsparungen umgesetzt wurden. Es liegt auf der Hand, dass bei einem Fortschritt dieser Entwicklung im Verkehrssektor die Klimaziele der Bundesregierung nicht eingehalten werden können. Zur Formulierung potentieller Ansatzpunkte für die nachhaltige Reduzierung der jährlichen Emissionen von 160 auf 98 Mio. t_{CO₂-Äq.} ist zunächst der Verkehrssektor im Detail zu betrachten.

Dabei muss zwischen dem Personenverkehr und dem Güterverkehr differenziert werden. In einer detaillierten Aufstellung der Emissionen, veröffentlicht in einer Studie des Bundestages [3], werden für das Jahr 2012 140,3 Mio. t_{CO₂-Äq.} für den Verkehrssektor angegeben². In Abbildung 1 sind die Daten dargelegt. Dabei entfallen auf den Güterverkehr 44 und auf den Personenverkehr ca. 96 Mio. t_{CO₂-Äq.}. Für beide Sektoren gilt, dass sowohl die Beförderung per Flugzeug, per Zug als auch per Schiff nur einen äußerst geringen Beitrag zu den Emissionen des jeweiligen Sektors beisteuern. In der Summe sind dem straßengebundenen Transport knapp 132,6 von rund 140,3 Mio. t_{CO₂-Äq.} zuzuschreiben. Dies entspricht einem Anteil von ca. 95 %. Wird zudem das Verhältnis der Beförderungsleistung und der dabei emittierten Treibhausgase für die jeweiligen Transportvektoren hinzugezogen, so weist insbesondere der Gütertransport auf der Straße deutliche Defizite auf: Während per Flugzeug, Binnenschifffahrt und Eisenbahn hohe Beförderungsleistungen (>28 %) bei anteilig geringen Emissionen zu verzeichnen sind, so fallen auf den straßengebundenen Güterverkehr über 90 % der Emissionen bei einem Transportanteil von lediglich 72 % an [4].

¹ Energie kann weder verbraucht noch erzeugt werden. Um mit dem allgemeinen Sprachgebrauch kompatibel zu bleiben, werden die gängigen aber thermodynamisch falschen Bezeichnungen auch in diesem Bericht genutzt.

² Die Abweichungen zu den Werten aus dem Klimaschutzplan 2050 sind darauf zurückzuführen, dass in der, der Abbildung zugrundeliegenden, Studie die Daten auf Kraftstoffabsätzen beruhen. Zudem ist der Studie zu entnehmen, dass die Vorkettenemissionen sowie Biokraftstoffe ausgeschlossen sind. Weiter heißt es, dass verursachte Treibhausgasemissionen durch den strombetriebenen Schienenverkehr sowie internationale Flüge nicht berücksichtigt wurden.

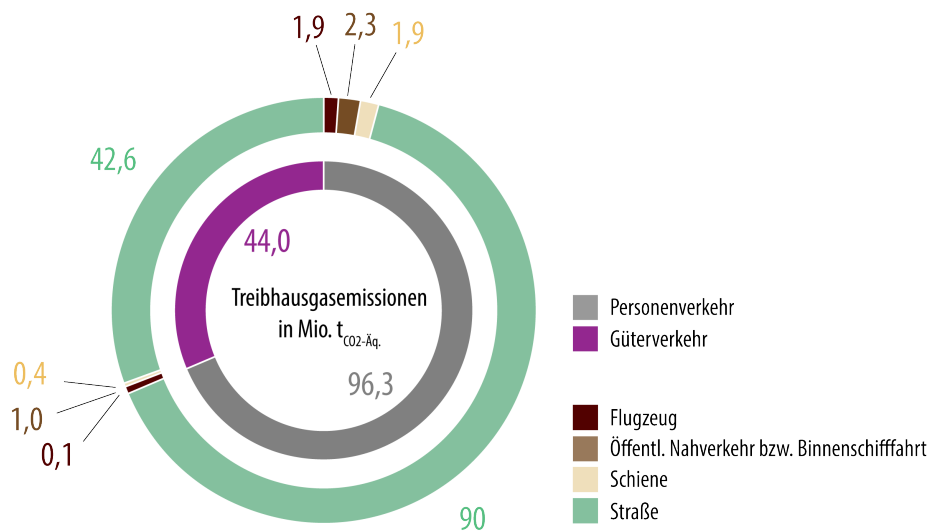


Abbildung 1: Treibhausgasemissionen des Personen- und Güterverkehrs im Jahr 2012, Datengrundlage [4]

Um die Klimaschutzziele der Bundesregierung einzuhalten, sind nach Rodt et al. [5] sowohl im Personen- als auch im Güterverkehr fünf strategische Maßnahmen denkbar:

- » Verkehrsvermeidung
- » Verkehrsverlagerung
- » Verkehrsoptimierung
- » Ökonomische Maßnahmen
- » Emissionsminderung (spezifische Emissionen der Fahrzeuge verringern)

Unter dem Begriff der Verkehrsvermeidung wird eine Verkürzung der Strecke zwischen Ausgangs- und Zielpunkt verstanden. Insbesondere durch die aktuelle Siedlungspolitik, dem Wunsch nach individueller Mobilität und der arbeitsteiligen Produktion ist die tatsächlich realisierbare CO₂-Einsparung (Emissionsminderung im Jahr 2020 gegenüber 2005 >15 Mio. t_{CO2}) durch derartige Maßnahmen fraglich.

Die Verkehrsverlagerung ist eng mit der Verkehrsvermeidung verknüpft. Hierbei wird jedoch die gezielte Nutzung emissionsarmer Transportvektoren angestrebt. Wie bereits erläutert, gibt es hierbei insbesondere im Bereich des Güterverkehrs ein großes Potenzial: Durch die Verlagerung der straßengebundenen Beförderung von Gütern auf schienengebundene Verkehrswege oder die Binnenschifffahrt könnten deutliche Emissionsminderungen erzielt werden. Diese Entwicklung wird jedoch durch die Infrastruktur sowie ausbleibende ökonomische Anreize gehemmt. Im Personenverkehr steht erneut der Wille nach einer individuellen Mobilität dieser Verlagerung entgegen. Ersichtlich wird dies beispielsweise daran, dass durch die Ersetzung von 50 % aller Pkw-Fahrten mit einer Strecke < 5 km durch Fahrrad- oder Fußverkehr jährlich 5 Mio. t_{CO2} (Bezugsjahr 2005) eingespart werden könnten. Es ist jedoch zu bezweifeln, dass Maßnahmen bspw. die Errichtung von Fahrradstationen an Haltestellen des ÖPNV o.ä. das individuelle Verhalten der Bürger derart stark beeinflussen werden.

Unter der Verkehrsoptimierung versteht Rodt et al. eine Verbesserung des Verhältnisses aus Transportbedürfnis und Fahrleistung. Dies beinhaltet sowohl eine direkte Anpassung der Fahrzeuge an die individuellen Bedürfnisse, eine Verringerung von Leerfahrten bzw. eine verbesserte Ausnutzung der Fahrleistung aber auch eine Routenoptimierung zur Verringerung des Verkehrsaufkommens. In einem speziellen Szenario könnte laut Rodt et al. dies jedoch zu einer Senkung

der straßengebundenen Transportkosten führen und damit eine Verlagerung des Gütertransports von der Schiene auf die Straße attraktiv werden. Nur eine, auf den gesamten Verkehrssektor bezogene, Verkehrsoptimierung kann zu einer Reduzierung der Emissionen beitragen. Da dies jedoch häufig nicht im persönlichen Horizont eines einzelnen Verkehrsteilnehmers liegt, ist der konkrete Beitrag dieses Szenarios fraglich.

Eine weitere Stellschraube sind verschiedene ökonomische Maßnahmen. Dabei wird versucht das Verhalten der Verkehrsteilnehmer zum einen durch steuerliche Vergünstigungen und zum anderen durch die Erhebung zusätzlicher Steuern bzw. Abgaben wie der Maut, der Energiesteuer oder einer emissionsbezogenen Kraftfahrzeugsteuer zu beeinflussen. Derartige Maßnahmen wurden mit der Einführung der Energiesteuer auf Otto- und Diesel-Kraftstoff im Jahr 1990 oder der Neuregelung der Kfz-Steuer im Jahr 2009 bereits initiiert. Rodt et al. führen aus, dass diese Maßnahmen sowohl eine Veränderung des Nutzerverhaltens herbeiführen (s.o., Stichwort *Verkehrsoptimierung*), aber auch für die Automobilindustrie Anreize schafft, spritsparende Fahrzeuge ihren Kunden anzubieten und somit ein großes und vor allem umsetzbares CO₂-Einsparpotenzial aufweisen.

Die wohl gravierendste Maßnahme zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen ist die Substitution konventioneller Antriebskonzepte und Kraftstoffe durch regenerative Ansätze. Gleichzeitig verspricht diese Vorgehensweise auch das größte Reduktionspotenzial. Als alternative Kraftstoffe sind sowohl Biokraftstoffe, fossile Energieträger mit einem geringen Kohlenstoffanteil (bspw. Erdgas oder Flüssiggas), aus erneuerbaren Energien synthetisierte Kraftstoffe, reiner Wasserstoff und die Elektromobilität zu nennen. Dabei stellt die Elektromobilität einen sehr effektiven Lösungsansatz zur Emissionsminderung dar. Nach aktuellem Stand der Technik sind mit batterieelektrischen Antrieben jedoch nur kleine bis mittlere Distanzen bei geringem Transportaufkommen abbildbar. Insbesondere für den Güterfernverkehr kann diese Lösung in absehbarer Zeit nicht als Alternative in Betracht gezogen werden. Die hohen Transportleistungen (bis zu 40 Tonnen) und großen Distanzen (über 500 km) bedingen die Diskussion von Biokraftstoffen, Erdgas, Synthesekraftstoffen und Wasserstoff für den Einsatz im Schwerlastverkehr.

Während fossiles Erdgas oder Flüssiggas durch den geringen Kohlenstoffanteil (im Vergleich zu Benzin oder Diesel) per Definitionem geringere spezifische CO₂-Emissionen aufweisen, können Biokraftstoffe unter Umständen sogar als CO₂-neutral bezeichnet werden. Dies trifft jedoch nur dann zu, wenn die Herstellung der Biomasse sowie die Konversion zum entsprechenden Biokraftstoff ebenfalls diese Anforderung erfüllt. Mit Hilfe von Wasserstoff und einer Kohlenstoffquelle (i.d.R. CO₂) können jegliche Kohlenwasserstoffe synthetisiert werden. Kommt der Wasserstoff aus einer erneuerbaren Quelle, so kann von einem erneuerbaren Kraftstoff gesprochen werden. Vorrangig sind hierbei Methan (CH₄), Methanol (CH₃OH) und Dimethylether (DME, CH₃OCH₃) aber auch Benzin- und Dieselsubstituenten (via Fischer-Tropsch, n-Hexadecan C₁₆H₃₄) zu nennen. Hinsichtlich der Produkteffizienz können synthetisierte Kraftstoffe mit einem geringen Kohlenstoffanteil Vorteile erlangen, da sowohl die fahrzeugseitigen Anpassungen als auch die Umstellung der Infrastruktur marginal ausfallen. Die aktuellen Antriebskonzepte und die Tankstelleninfrastruktur könnten weitestgehend erhalten bleiben. Allen Konzepten ist jedoch gemein, dass die Problematik der lokal auftretenden Emissionen (NO_x-, CO₂- oder Rußemissionen in Städten) nicht gelöst wird – auch wenn teilweise von einer globalen CO₂-Neutralität gesprochen werden kann. Gegen die biomassebasierten Ansätze sprechen zudem zwei wesentliche Aspekte: 1.) Der Bedarf an Biokraftstoffen übersteigt das potentielle Angebot um ein Vielfaches. 2.) Der Wirkungsgrad der Konversionskette und der Nutzung im mobilen Sektor ist gering. Im Falle der synthetischen Kraftstoffe ist anzumerken, dass für die Synthese von Methan, Methanol, Dimethylether oder Dieselsubstituenten (via Fischer-Tropsch) elementarer Wasserstoff als Ausgangsstoff bereitgestellt werden muss. Dieser ist sowohl energetisch als auch ökonomisch äußerst

wertvoll und wird durch die Konversion zu Methan, Methanol oder Dieselsubstituenten in beiden Gesichtspunkten abgewertet. Da dieser Aspekt von großer Bedeutung ist, muss von einer deutlichen Reduzierung der Produkteffizienz ausgegangen werden. Als Alternative dazu kann regenerativ erzeugter Wasserstoff direkt genutzt werden. Dies hätte den Vorteil, dass der verlustbehaftete Konversionsschritt (Kraftstoffsynthese) sowie die kohlenstoffbasierten Emissionen (CO₂- oder Ruß) vermieden werden. Eine hohe Produkteffizienz ist somit denkbar. Allerdings sind die Veränderungen im Fahrzeug sowie an der Infrastruktur stark von der eingesetzten Wasserstoffspeichertechnologie sowie der gewählten Technologie zur Umsetzung des Wasserstoffs im Fahrzeug abhängig.

Die vorliegende Studie setzt genau in diesem Aspekt an. Dabei wird die technologische, ökonomische und ökologische Eignung der LOHC-Technologie (liquid organic hydrogen carrier, LOHC) für den Einsatz als Wasserstoffspeicher im Schwerlastverkehr untersucht. Die Grundlage bildet der IST-Zustand der Antriebskonzepte im Güterfernverkehr sowie die daraus abgeleiteten Anforderungen an einen alternativen Antriebsstrang. Die Frage **Warum Wasserstoff als Kraftstoff?** wird anschließend sowohl aus ökonomischen als auch aus technischen Gesichtspunkten beleuchtet. Der einfachen Bereitstellung von Wasserstoff sowie dem hohen gravimetrischen Energieinhalt steht das Kernproblem der Nutzung von Wasserstoff gegenüber: die geringe Dichte bei Umgebungsbedingungen. Ausgehend von den technischen und wirtschaftlichen Hürden der Druck- und Flüssigwasserstoffspeicherung im Mobilitätssektor wird die LOHC-Technologie eingeführt. Die Fragestellung **LOHC – was ist darunter zu verstehen?** wird mit einer Beschreibung der Grundidee, der Entwicklungsgeschichte und dem aktuell eingesetzten Stoffsystem und dessen Besonderheiten beantwortet. Ein Vergleich mit der Druckwasserstofftechnologie soll die Vorteile dieses Wasserstoffspeicherkonzepts im Kontext der Anforderungen an einen alternativen Kraftstoff für den Schwerlastverkehr verdeutlichen. Folglich stellt sich die Frage: **Wie sieht ein LOHC-basierter Antriebsstrang aus?** Kernkomponente ist hierbei die zentrale Wasserstofffreisetzungseinheit. Der freigesetzte Wasserstoff kann anschließend entweder über einen Wasserstoffverbrennungsmotor oder eine Brennstoffzelle (mit Elektromotor) in die gewünschte Antriebsenergie umgewandelt werden. Aspekte wie die Kaltstartfähigkeit oder die Dynamik des Antriebsstrangs werden dabei für beide Varianten untersucht. Zu einem LOHC-basierten Antriebsstrang muss auch eine entsprechende Infrastruktur konzipiert werden. Erste Gedankengänge zur Frage **Wie sieht die LOHC-Infrastruktur aus?** beinhalten die Aspekte der zentralen/dezentralen Wasserstoffbereitstellung, der Einführung eines LOHC-Pfandsystems sowie die tankstellenseitigen Anpassungen. Darüber hinaus wird das Potenzial zur Nutzung der existierenden Kraftstoffinfrastruktur hervorgehoben. Zur Bewertung aller denkbaren Szenarien und Konzepte ist der heutige Entwicklungsstand der LOHC-basierten Antriebsstränge sowie der LOHC-Infrastruktur festzuhalten. **Wo wir stehen** beleuchtet dabei den Status-quo und leitet den jeweiligen Handlungsbedarf ab. Unter dem Motto **Was getan werden muss** sind Arbeitspakete formuliert, die für den Aufbau eines Prototyps und die Installation einer LOHC-Infrastruktur in einer Pilotregion anzugehen sind. Neben den technischen Fragestellungen werden auch notwendige Weichenstellungen der Politik aufgezeigt, die mit Gesetzesänderungen die Entwicklungsschritte dieser Technologie beeinflussen kann. Der **abschließende Systemvergleich** setzt den aktuellen Stand der LOHC-Technologie in Bezug zu den alternativen regenerativen Antriebskonzepten im Bereich des Schwerlastverkehrs.

2 Der Schwerlastverkehr -

Herausforderung und Chancen

2.1 StraÙengebundener G¼tertransport

Bei der Betrachtung des G¼terverkehrs ist die Differenzierung zwischen dem Transportaufkommen (in t) sowie der Transportleistung (in tkm) zu ber¼cksichtigen. Letztere setzt sich aus der transportierten Masse sowie der Distanz zusammen und ist eine g¼ngige GröÙe bei der statistischen Erfassung der Entwicklungen im Transportsektor.

Grundlegend ist festzustellen, dass die j¼hrliche Transportleistung stark mit der aktuellen Wirtschaftslage korreliert. So ist seit Jahrzehnten – mit Ausnahme der konjunkturschwachen Jahre nach der Weltwirtschaftskrise 2008 – ein stetiger Zuwachs des Logistiksektors zu beobachten. Dabei stieg die Beförderungleistung seit dem Jahr 2000 bis 2015 um 27 % an³. Bei den dabei eingesetzten Beförderungsmitteln ist über die Jahre hinweg kein kontinuierliches Wachstum zu beobachten. Während die straÙengebundene Transportleistung 2000 noch einen Anteil von 69,8 % einnahm, so stieg dieser bis Ende 2015 auf 73,0 % an [6]. Im Jahr 2016 werden in Deutschland durch den StraÙenverkehr 3.630,7 Mio. t G¼ter mit einer Beförderungleistung von 484,1 Mrd. tkm abgewickelt [7].

Die vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur in Auftrag gegebene Verkehrsverflechtungsprognose 2030 [8] kommt zu dem Schluss, dass die Transportleistung des gesamten G¼terverkehrssektors bis zum Jahr 2030 um 37,9 % weiter ansteigt (Bezugsjahr 2010). Dabei wird dem straÙengebundenen Transport eine Wachstumsrate von 38,9 % und der schienengebundenen Beförderung ein Anstieg um 42,9 % zugesprochen. Die Studie prognostiziert zudem, dass die steigende Transportleistung nicht mit dem Transportaufkommen korreliert. Zwar nimmt die Masse der beförderten G¼ter zu, jedoch in einem geringeren Umfang wie die Transportleistung. Es kann somit angenommen werden, dass der straÙengebundene Fernverkehr sowie das Zusammenspiel von Schienen- und StraÙenverkehr diesen Sektor zunehmend pr¼gen werden. Wie **Abbildung 2** zeigt, kann durch eine Analyse des Transportaufkommens und der Transportleistung der letzten Jahre dieser Trend bereits heute beobachtet werden: Während Transportleistung im Nahverkehr stagniert, gewinnen der Regional- und insbesondere der G¼terfernverkehr signifikant an Bedeutung [7].

³ Die Beförderungleistung betrug im Jahr 2000 511 Mrd. tkm und stieg bis 2015 auf 650 Mrd. tkm an (entspricht 27,2 %). Dahingegen betrug die Beförderungsmenge im Jahr 2000 noch 4.126 Mio. t und stieg um 9,5 % auf 4.515 Mio. t.

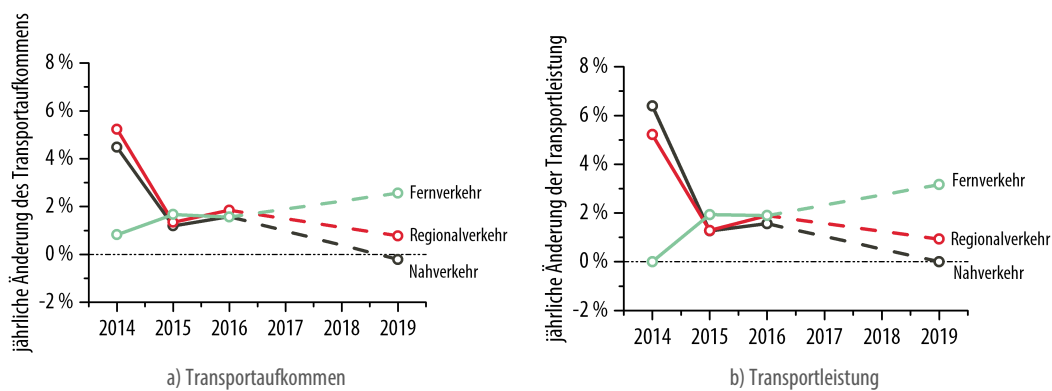


Abbildung 2: Entwicklung des Transportaufkommens und der Transportleistung im straßengebundenen Güterverkehr [7]

2.2 Status quo: Zusammensetzung des Nutzfahrzeugbestands

Das von deutschen Fahrzeugen beförderte Transportaufkommen von rund 3,1 Mrd. t (Transportleistung von 296 Mrd. tkm) im Jahr 2016 [7] wird durch einen inhomogenen Flottenbestand abgewickelt. Im Wesentlichen werden die Nutzfahrzeuge hinsichtlich ihres zulässigen Gesamtgewichtes (bzw. der Nutzlast) differenziert, welches auch das Fahrprofil der Nutzfahrzeuge bestimmt. Einfach ausgedrückt: Es gibt eine Korrelation zwischen dem zulässigen Gesamtgewicht und der zurückzulegenden Strecke. Dabei ist wichtig zu wissen, dass Fahrzeuge des Güterverkehrs in Lastkraftwagen und Sattelzugmaschinen unterteilt werden. Lastkraftwagen sind Einheiten, die an sich – also ohne weitere Konfiguration – zum Transport von Gütern befähigt sind. Sattelzugmaschinen bestehen per Definitionem lediglich aus einer Zugsinheit, die erst mit einem Anhänger zur Beförderung von Gegenständen oder Waren eingesetzt werden kann.

Der aktuelle Nutzfahrzeugbestand wird vom Kraftfahr-Bundesamt sehr detailliert erfasst [9]. Zu Beginn des Jahres 2016 waren in Deutschland 3,0 Mio. Nutzfahrzeuge zugelassen. Wie die **Abbildung 3** zeigt, stellen Fahrzeuge mit einem zulässigen Gesamtgewicht < 3,5 t den größten Teil mit knapp 2,3 Mio. Zulassungen dar. Darunter fallen PKW-ähnliche Fahrzeuge, die primär im urbanen Raum zur Auslieferung von Waren oder auf Baustellen eingesetzt werden [10]. Fahrzeuge bis zu einem Gesamtgewicht von 12 t werden im regionalen Verteilverkehr eingesetzt. Die Zahl der Zulassungen betrug circa 330.000. Die verbleibenden Fahrzeuge mit einem zulässigen Gesamtgewicht über 12 t werden vornehmlich im Fernverkehr eingesetzt. Sie verbinden einzelne Unternehmen auf nationaler und internationaler Ebene. Zusammen mit den Sattelzugmaschinen können sie als Schwere-LKWs bezeichnet werden. Zu Beginn des Jahres 2016 belief sich die Zahl der Zulassungen auf knapp 390.000.

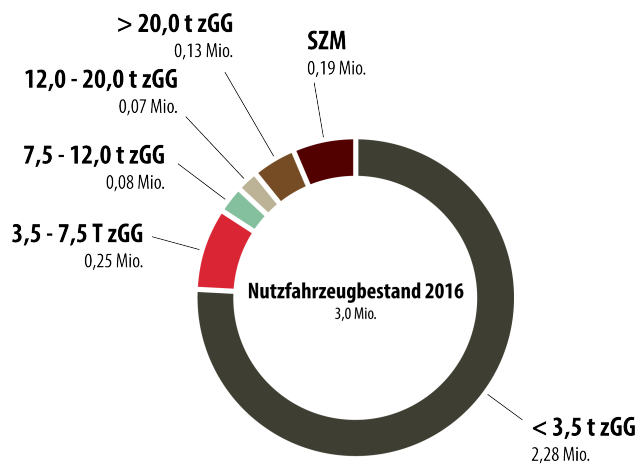


Abbildung 3: Differenzierung des Fahrzeugbestands im Güterkehr nach zulässigem Gesamtgewicht [9]

Neben der Information, dass dem Güterfernverkehr eine steigende Bedeutung in den kommenden Jahren zugeschrieben wird, ist die Entwicklung der Flottenzusammensetzung von großer Bedeutung bei der Identifikation von Ansatzpunkten für emissionsmindernde Maßnahmen. So kann bei einer Analyse des Flottenbestands der vergangenen Jahre der zunehmende Trend zu lediglich vier, der oben diskutierten sechs Fahrzeugkategorien herausgearbeitet werden. Dazu ist in **Abbildung 4** die relative Änderung der Zulassungen bezogen auf den Bestand im Jahr 2016 dargestellt⁴. Dabei ist zu sehen, dass im Jahr 2008 noch circa 20 % mehr Fahrzeuge mit einem zulässigen Gesamtgewicht von 3,5 – 7,5 t sowie von 12 – 20 t zugelassen waren. Der stetige Abwärtstrend lässt vermuten, dass diese Fahrzeugklasse in Zukunft deutlich an Bedeutung verliert. Dahingegen zeigen sich bei PKW-ähnlichen Nutzfahrzeugen (< 3,5 t zGG), mittelgroßen LKWs (7,5 - 12 t zGG) und Schweren-LKWs (Sattelzugmaschinen und > 20 t zGG) deutliche Zunahmen des Fahrzeugbestands. Die Zuwachsraten liegen hierbei zwischen 8 und 23 % bezogen auf das gewählte Referenzjahr 2016.

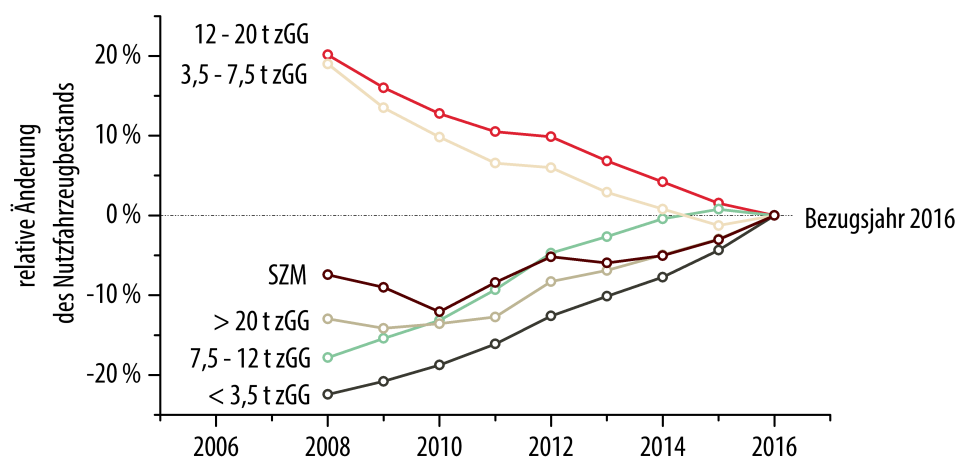


Abbildung 4: Bestandsentwicklung von Nutzfahrzeugen [9]

⁴ Im Jahr 2007 wurde die Datenerhebung für den Bestand verändert und somit sind Daten für die Jahre vor 2008 nicht bzw. nur schwer vergleichbar.

Die aktuellen Nutzfahrzeuge werden fast ausschließlich mit Diesel betrieben. Lediglich bei Fahrzeugen mit geringen Nutzlasten (< 2 t Ntzl) werden zu geringen Anteilen Ottokraftstoff, Flüssiggas oder Erdgas eingesetzt. Nichtsdestotrotz liegt der Anteil von dieselbetriebenen Fahrzeugen auch in dieser Sparte bei 93,6 %. Bei den Schwere-LKWs (Nutzlast > 12 t und Sattelzugmaschinen) liegt diese Quote sogar bei 99,9 % [11].

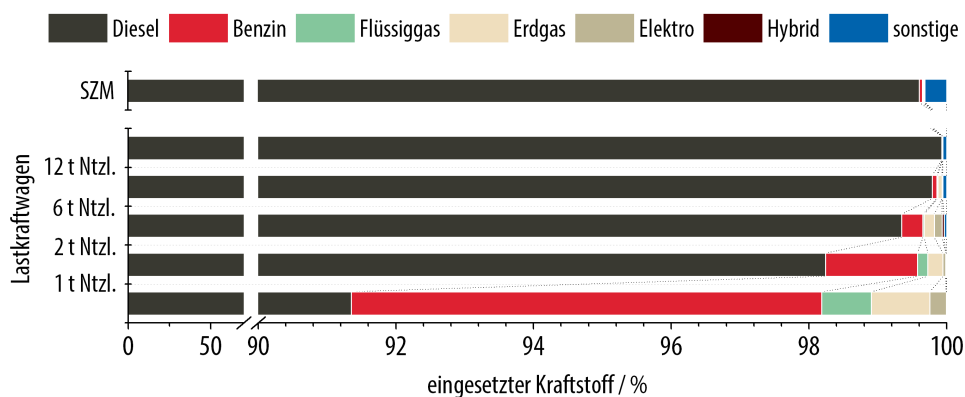


Abbildung 5: Antriebskonzepte von Nutzfahrzeugen nach zulässiger Nutzlast [11]

2.3 Fahrprofile setzen Randbedingungen für alternative Kraftstoffe

Basierend auf den obigen Ausführungen lässt sich folgende Aufgabenstellung ableiten: Welche alternativen Kraftstoffe und Antriebssysteme erfüllen die spezifischen Anforderungen

- » der Kurzstrecke (LKWs mit < 3,5 t zGG)
- » des Regionalverkehrs (LKWs mit 7,5 t < zGG < 12 t)
- » und des Fernverkehrs (LKWs mit > 12 t zGG und Sattelzugmaschinen)

um die aktuell dieselbetriebenen Systeme zu ersetzen und damit zu einer nachhaltigen Emissionsminderung beizutragen?

Grundlegend stehen dazu neben den Biokraftstoffen auch fossile Energieträger mit einem geringen Kohlenstoffanteil (bspw. Erdgas oder Flüssiggas), die aus erneuerbaren Energien synthetisierten Kraftstoffe, wasserstoffbasierte Technologien sowie die Elektromobilität zur Verfügung. Eine fahrzeugübergreifende Lösung scheint jedoch nicht möglich, da die unterschiedlichen Ansätze unterschiedliche Vor- und Nachteile aufweisen.

Unter der Voraussetzung, dass die elektrische Energie allein aus erneuerbaren Quellen stammt (was 2017 nur zu ca. 1/3 richtig war), kann die Elektromobilität zweifelsohne direkt zur Emissionsminderung beitragen. Zudem weist sie aus energetischer Sicht entscheidende Vorteile gegenüber den Alternativen auf. Neben den hohen Wirkungsgraden der Elektromotoren sind die nicht auftretenden Wandlungsverluste in der Energiekette - ausgehend von der erneuerbaren Energiequelle bis hin zum Antrieb - zu nennen. Entscheidender Punkt ist jedoch die Speicherung der elektrischen Energie. Aufgrund der geringen Energiespeicherdichte (0,08 - 0,24 kWh_{el}/kg bzw. 0,19 - 0,5 kWh_{el}/L [12]) sind batterieelektrische

Systeme aktuell durch geringe bis mittlere Reichweiten bzw. Transportleistungen charakterisiert. Im Bereich des Individualverkehrs stößt dies in der Bevölkerung auf Widerstand. Der Einschnitt bzw. die resultierenden Einschränkungen der individuellen Mobilitätsfreiheit gegenüber fossil-betriebenen Fahrzeugen mit großen Reichweiten werden äußerst kritisch betrachtet. Dass im Bereich des Güterverkehrs aktuell 60 % der Strecken eine Distanz von unter 50 km, 82 % von unter 150 km aufweisen und lediglich 18 % dem Fernbereich (> 150 km) zugeschrieben werden [13], bekräftigt jedoch die Aussage, dass bereits nach dem aktuellen Stand der Technik die Elektromobilität ein großes Potenzial zur Emissionsminderung zugeschrieben werden muss. Auch die Bundesregierung verfolgt diesen Pfad und hat im Regierungsprogramm Elektromobilität 2011 eine Zielquote für Elektrofahrzeuge auf 6 Millionen im Jahr 2030 definiert [14]. Es wird angestrebt, kurze bis mittlere Strecken mit einem mäßigen Beförderungsaufkommen mit Hilfe batterieelektrischer Antriebe abzubilden. Dies gilt sowohl für den Personen- als auch für den Güterverkehr.

Für leichte Nutzfahrzeuge, die im urbanen und regionalen Lieferverkehr eingesetzt werden, steht somit eine energetisch und ökologisch zweckmäßige Lösung parat, die darüber hinaus bereits nach aktuellem Stand der Technik als „greifbar“ bezeichnet werden kann. Die notwendigen (zeitintensiven) Ladevorgänge könnten über Nacht in den Fuhrparks der Unternehmen durchgeführt werden. Fehlende ökonomische Reize könnten direkt durch Steuervergünstigungen und indirekt, durch eine Besteuerung konventioneller Kraftstoffe gesetzt werden. Projekte wie der von Daimler 2016 vorgestellte Vision Van [15] bestätigen die Umsetzbarkeit eines batterieelektrischen Verteilverkehrs in naher Zukunft. Mit einer Reichweite von 270 km, einer lokalen Emissionsfreiheit sowie einer geräuscharmen Fahrweise zeigt die Konzeptstudie Vision Van die Möglichkeiten des aktuellen und zukünftigen Stands der Technik auf. Der ebenso von Daimler vorgestellte Mercedes-Benz Urban eTruck (26 t zGG) zeigt, dass auch für ein großes Transportaufkommen der vollelektrische Antrieb realisierbar ist [16]. Wie der Name des Konzeptfahrzeugs jedoch schon verrät, liegt der potenzielle Einsatzbereich im städtischen Verteil- und Lieferverkehr mit Reichweiten⁵ von bis zu 200 km [17].

Für den stetig zunehmenden straßengebundenen Güterfernverkehr und die eingesetzten Schweren-LKWs bzw. Sattelzugmaschinen ist die Einführung batterieelektrischer Antriebe aufgrund der begrenzten Reichweite (aktuell) nicht denkbar. Die Leistungsdichte einer Batterie ist zu gering um die Transportleistung bzw. die notwendigen Strecken (>500 km) abzubilden. Zur Reduzierung der Emissionen des Güterfernverkehrs muss demnach auf andere Ansätze zurückgegriffen werden.

Die Installation von Oberleitungen auf Fernverkehrsstraßen kann die fehlende Speicherfähigkeit der Batterien nicht kompensiert werden. Würden in einem Stau Hunderte von LKW mehr oder weniger synchron anfahren, sind lokale Leistungen eines mittelgroßen konventionellen Kraftwerks notwendig. Solche Leistungen können wie bei ICE-Fahrstrecken nur durch begleitende Höchstspannungsleitungen transportiert werden. Man bedenke, dass 500 LKW mit einem Tankvorrat von 1000 Litern eine Energiemenge von 5.000 MWh_{th} speichern.

⁵ Zum Einsatz kommt dabei eine Lithium-Ionen-Batterie mit einer Kapazität von 212 kWh.

2.4 Herausforderung Güterfernverkehr: Energiespeicherdichte und Leistungsbedarf

Um die genannten Alternativen gegenüberzustellen, sind zunächst die Rahmenbedingungen des Güterfernverkehrs darzulegen. Die im Jahr 2016 zugelassenen Schwere-LKWs (320.000) werden primär mit Dieselkraftstoff betrieben. Dieser hat eine Energiedichte von $11,97 \text{ kWh}_{\text{th}}/\text{kg}$ bzw. $9,96 \text{ kWh}_{\text{th}}/\text{L}$ (25°C , 1 bar) [18] und liegt im flüssigen Aggregatzustand vor. Bezogen auf den Heizwert werden ausgehend von der Dieselherstellung bis zur Verbrennung ca. $320 \text{ g}_{\text{CO}_2\text{-Äq.}}/\text{kWh}_{\text{th}}$ [19] freigesetzt. Laut dem statistischen Bundesamt betrug der Dieselverbrauch des Schwerlastverkehrs (>3,5 t Ntzt. und Sattelzugmaschinen) 10,1 Mrd. L_{Diesel} im Jahr 2014 [20]. Dies entspricht einer Energiemenge von circa $100 \text{ TWh}_{\text{th}}$ (Heizwert). Unter Berücksichtigung der spezifischen Emissionen von $320 \text{ g}_{\text{CO}_2\text{-Äq.}}/\text{kWh}_{\text{th}}$ ergeben sich damit für den Schwerlastverkehr circa 32 Mio. $\text{t}_{\text{CO}_2\text{-Äq.}}$. In der gleichen Studie [20] gibt das statistische Bundesamt für den Schwerlastverkehr einen durchschnittlichen Verbrauch von $34,1 \text{ L}_{\text{Diesel}}/100 \text{ km}$ im Jahr 2014 an. Bezogen auf die Transportleistung wird von einem spezifischen Verbrauch von $3,3 \text{ L}_{\text{Diesel}}/100 \text{ tkm}$ ausgegangen. Mit einer maximal zulässigen Tankgröße von 1.500 L [21] sind somit eine theoretische Reichweite über 4.000 km bzw. eine Transportleistung über 45.000 tkm mit einer einzigen Tankladung möglich. Es ist davon auszugehen, dass der Wirkungsgrad der Antriebseinheit je nach Lastprofil zwischen 35 und 41 % [22] liegt. Mit einem Dieselverbrauch von $34,1 \text{ L}/100 \text{ km}$ ergibt sich unter Berücksichtigung des Heizwertes eine geforderte Antriebsenergie von circa 120 bis $140 \text{ kWh}_{\text{mech}}/\text{pro } 100 \text{ km}$. Dabei liegt die Leistungsanforderung eines Schwerlast-LKW in der Ebene bei 110 bis $120 \text{ kW}_{\text{mech}}$ und im Vollastpunkt zwischen 320 und $360 \text{ kW}_{\text{mech}}$ [22].

Das Durchschnittsalter der Sattelzugmaschinen betrug im Jahr 2009 3,8 Jahre [23] und das der LKWs 7,9 Jahre (Stand 2017) [24]. Die mit diesen Angaben einhergehende kurze Lebensdauer der Fahrzeuge bietet die große Chance, den Flottenbestand innerhalb weniger Jahre mit einer neuen Technologie auszustatten bzw. auszutauschen. Gleichzeitig bedingt diese Tatsache die Forderung nach einer stabilen Technik, um die Wartungsintervalle groß bzw. die Ausfallzeiten gering zu halten. Nur so ist eine schnelle Amortisation für die Spedition erzielbar.

Dieselbetriebene Schwerlast-LKWs können auf eine umfangreiche Tankstelleninfrastruktur zurückgreifen, obwohl viele Speditionen einen Punkt zu Punkt Verkehr realisieren, wo am Start und am Endpunkt getankt wird. Im Jahr 2015 konnte in Deutschland an 14.531 Tankstellen Diesel bezogen werden [25]. Bei einer Dieselförderung⁶ von 90 L/min ergibt sich bei einem maximalen Tankvolumen von 1.500 L eine Tankzeit von circa 16 Minuten. Bezogen auf die Reichweite kann eine spezifische Tankzeit von circa 23 Sekunden pro 100 km Reichweite ermittelt werden.

Die hohe Energiedichte des Dieselkraftstoffs und die damit verbundenen großen Reichweiten stellen eine immense Herausforderung an alternative, umweltschonendere Antriebskonzepte dar. Durch die exzellent ausgebaute Infrastruktur und die Benutzerfreundlichkeit - im Sinne geringer Tankzeiten und der allgegenwärtigen Kraftstoffverfügbarkeit - sind weitere Rahmenbedingungen gegeben, die bei der Einführung regenerativer Energiequellen berücksichtigt werden müssen. Kernaspekt bei der Bewertung von alternativen Konzepten muss jedoch auch der jährliche Energiebedarf des Schwerlastverkehrs sein. Eine hohe Effizienz des Antriebssystems sowie eine verlustarme Herstellungskette des Energieträgers (bzw. Kraftstoffs) ist notwendig, um eine jährliche Antriebsenergie von circa $35 \dots 41 \text{ TWh}_{\text{mech}}$ auf die Straße zu bringen.

⁶ Bspw. PIUSI Self Service 100 FM Hof tankstelle

2.5 Energiebedarf Verkehrssektor vs. regenerative Energiequellen

Wie im vorherigen Kapitel beschrieben, beträgt der End-Energiebedarf des Schwerlastverkehrs circa 100 TWh. Radke et al. [26] gibt darüber hinaus für den Güterverkehr im Jahr 2016 einen End-Energiebedarf von 184 TWh sowie für den gesamten Straßenverkehr 608 TWh an. Wenn vereinfachend von einem mittleren Wirkungsgrad der Verbrennungsmotoren von 35 % ausgegangen wird, ergeben sich für den Straßenverkehr circa 210 TWh_{mech}, die jährlich als Antriebsenergie bereitgestellt werden müssen. Dagegen betrug im Jahr 2015 die installierte Leistung von Photovoltaik und On-/Off-Shore Wind knapp 85 GW_{el}. Über das Jahr hinweg wurde dabei eine elektrische Energiemenge von circa 120 TWh_{el} eingespeist [27]. Selbst unter der Annahme, dass im gesamten straßengebundenen Verkehrssektor die Elektromobilität mit einem hohen Wirkungsgrad von 85 % zum Einsatz käme (Annahme), könnte mit dem aktuellen Angebot erneuerbarer Energien nur ein Bruchteil des Energiebedarfs gedeckt werden (49 %, bezogen auf den Energiebedarf des Straßenverkehrs 2016). Daraus lassen sich drei Aspekte ableiten:

- 1.) Jede Alternative zu batterieelektrischen Antrieben ist über weitere Verluste durch Konversionsschritte (bspw. Elektrolyse) und Speichervorgänge geprägt. Das Potenzial zur Deckung des Energiebedarfs sinkt somit weiter. Es ist demnach auf eine möglichst hohe Effizienz, ausgehend vom Strom, über Konversion und Speicherung bis hin zur Antriebsenergie zu achten.
- 2.) Die aktuell installierte Leistung der erneuerbaren Energien dient zur Versorgung des Elektrizitätsnetzes und kann (sicherlich) nur in sehr begrenztem Maße für Mobilitätszwecke abgegriffen werden. Ohne einen wesentlichen Zubau der Photovoltaik- und Windkraftleistung (und damit der jährlichen Energiemenge) ist selbst die regenerative Teilversorgung des straßengebundenen Verkehrs nicht denkbar.
- 3.) Soll der gesamte Verkehrssektor abgebildet werden, so ist der Import erneuerbarer Energien beispielsweise aus Nordafrika, Kanada oder Island unausweichlich. Da der leitungsgebundene Transport in der Regel mit enormen Kosten und politischen Hürden verbunden ist, muss über einen nicht-leitungsgebundenen Energietransportvektor nachgedacht werden. Dabei spielt neben der Handhabung und Energiespeicherdichte die Integrierbarkeit in existierende Infrastrukturen eine entscheidende Rolle.

Nur bei Einbeziehung dieser drei Faktoren kann eine dramatische Reduzierung der Emissionen des Verkehrssektors erzielt werden.

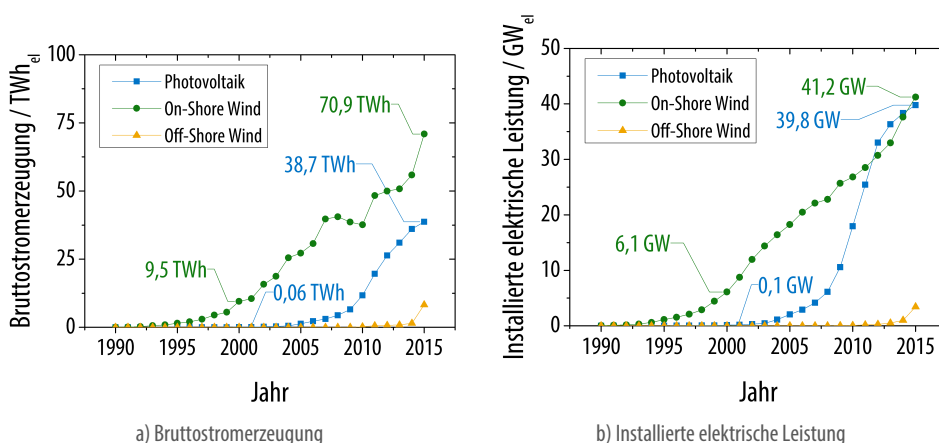


Abbildung 6: Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland [27]

3 Warum Wasserstoff als Kraftstoff?

Zur Bewertung der Effizienz eines Fahrzeugs ist heutzutage bei weitem nicht mehr nur die Antriebseinheit zu berücksichtigen. Vielmehr muss die *Produkteffizienz* herangezogen werden, die insbesondere den Lebenszyklus aller Komponenten sowie die Herstellung des Kraftstoffs einbezieht. Im Wesentlichen können vier Bereiche unter den Begriff der Produkteffizienz zusammengefasst werden:

- » Energie- und Rohstoffbedarf für die Bereitstellung und Speicherung des Kraftstoffs
- » Effizienz der Umsetzung in Antriebsenergie
- » Ökobilanz (Schadstoff-, Luft-, Lärmemissionen)
- » Recycling und Entsorgung der Komponenten

Diese vier Gesichtspunkte sind eng miteinander verflochten. Unter den Gesichtspunkt des Energie- und Rohstoffbedarfs für die Speicherung des Kraftstoffs fällt neben der Kraftstoffsynthese auch die Möglichkeit der Nutzung existierender Infrastrukturen. Können bekannte Transport- und Speichermöglichkeiten genutzt werden, so schont dies den Rohstoffbedarf für den Aufbau der Kraftstoffversorgungsstruktur. Die Effizienz der fahrzeugeitigen Umsetzung in Antriebsenergie spielt die entscheidende Rolle für den spezifischen Kraftstoffverbrauch und die damit verbundene Ökobilanz. Gleichzeitig ist in diesem Kontext der Energie- und Rohstoffbedarf für die Bereitstellung des Kraftstoffs einzubeziehen. Eng mit der Ökobilanz verbunden ist die Bewertung der eingesetzten Materialien und Komponenten im Kontext der Entsorgung und Wiederverwertung. Die ganzheitliche Bewertung der Produkteffizienz ist eine große Herausforderung und kann nur mit immensem Aufwand betrieben werden. Für erneuerbarer Kraftstoffe ist die Produkteffizienz zunehmend durch den Energie- und Rohstoffbedarf für die Bereitstellung und vor allem die Speicherung des Kraftstoffs geprägt. Im Kontext der hier zu diskutierenden Möglichkeiten zur Emissionsreduzierung des Schwerlastverkehrs sind darüber hinaus die Schadstoff-, Luft- und Lärmemissionen einzubeziehen.

Im Folgenden wird eine kurze Gegenüberstellung unterschiedlicher Ansätze erneuerbarer Kraftstoffe im Sinne eines ökonomischen und energetischen Vergleichs durchgeführt. Ziel ist es, den hohen wirtschaftlichen aber auch technologischen Wert von Wasserstoff argumentativ zu begründen. Ziel ist es nicht, die jeweilige Technologie im Detail darzulegen. Dafür wird auf entsprechende Studien verwiesen [10, 19, 23, 28-30].

3.1 Ökonomischer Vergleich: stoffliche Gegenüberstellung

Für eine vollständige ökonomische Gegenüberstellung der Synthesekraftstoffe Methan, Methanol, Dimethylether (DME) oder Fischer-Tropsch-Diesel ist eine umfangreiche Kostenrechnung unter Einbeziehung von Investitions- und Betriebskosten sowie eine detaillierte Energiebilanzierung durchzuführen. Dies gilt nicht, wenn bestimmte Arten von Kraftstoffen zwingend sind wie die Dieselvariante Jet A-1 als Treibstoff für Strahltriebwerke. Hier steht die Möglichkeit zu fliegen im Vordergrund. Im Folgenden soll mit einer sehr einfachen ökonomischen Gegenüberstellung gezeigt werden, dass die Konversion von Wasserstoff zu alternativen Energieträgern bereits allein auf stofflicher Ebene nicht darstellbar ist.

Dazu werden folgende, stark vereinfachte Reaktionspfade für die Synthese oben genannter Kraftstoffe berücksichtigt:

- » Wasserstoff: H_2
- » Methan: $4 \text{H}_2 + \text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{CH}_4 + 2 \text{H}_2\text{O}$
- » Methanol: $3 \text{H}_2 + \text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O}$
- » Dimethylether: $6 \text{H}_2 + 2 \text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{CH}_3\text{OCH}_3 + 3 \text{H}_2\text{O}$
- » n-Hexadecan (Dieselsubstituent): $49 \text{H}_2 + 16 \text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{C}_{16}\text{H}_{34} + 32 \text{H}_2\text{O}$

Allen Syntheserouten ist gemein, dass Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid als Edukte bereitgestellt werden müssen. Um eine aufwändige Stofftrennung nach der Synthese zu vermeiden, ist das CO_2 hierbei in einer möglichst reinen Form vorzulegen. Dies ist jedoch nur durch einen (nicht-unwesentlichen) Energieeinsatz zu gewährleisten (reines CO_2 ist ein Wertstoff). Ungeachtet dieser Tatsache soll die CO_2 -Bereitstellungskette im Folgenden vernachlässigt werden und CO_2 „kostenlos“ zur Verfügung stehen. Darüber hinaus werden keine Anlagenkosten berücksichtigt. Die Kosten des Produktes aus den jeweiligen Verfahrenen werden somit sehr vereinfacht durch die Herstellungskosten des eingesetzten Wasserstoffs verursacht. Durch eine einfache Massenbilanz obiger Konversionsschritte kann ermittelt werden, welche Menge an Wasserstoff für ein Kilogramm des jeweiligen Kraftstoffs notwendig ist.

- » Wasserstoff: H_2
- » Methan: $1 \text{ kg}_{\text{H}_2} + 5,5 \text{ kg}_{\text{CO}_2} \rightleftharpoons 2 \text{ kg}_{\text{CH}_4} + 4,5 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}$
- » Methanol: $1 \text{ kg}_{\text{H}_2} + 7,3 \text{ kg}_{\text{CO}_2} \rightleftharpoons 5,3 \text{ kg}_{\text{CH}_3\text{OH}} + 3 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}$
- » Dimethylether: $1 \text{ kg}_{\text{H}_2} + 7,1 \text{ kg}_{\text{CO}_2} \rightleftharpoons 3,8 \text{ kg}_{\text{CH}_3\text{OCH}_3} + 4,5 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}$
- » n-Hexadecan (Dieselsubstituent): $1 \text{ kg}_{\text{H}_2} + 7,3 \text{ kg}_{\text{CO}_2} \rightleftharpoons 2,3 \text{ kg}_{\text{C}_{16}\text{H}_{34}} + 5,8 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}$

Wird diese Rechnung zudem mit den spezifischen Kosten des eingesetzten Wasserstoffs (€ pro kg_{H_2}) versehen, ergeben sich die unteren Grenzkosten des jeweilig synthetisierten Kraftstoffs. In anderen Worten: Für diesen Preis muss der Kraftstoff mindestens verkauft werden, um nur die stofflichen Kosten des eingesetzten Wasserstoffs gerade zu decken, die anderen Stoffe sowie die Prozesskosten sind nicht gerechnet. Zur Beantwortung der Frage nach den spezifischen Wasserstoffbereitstellungskosten (€/kg $_{\text{H}_2}$) wird die im Jahr 2014 veröffentlichte Literaturübersicht von Grube und Höhle [31] herangezogen. Dabei wird zwischen unterschiedlichen Technologien sowie einer zentralen bzw. dezentralen H_2 -Erzeugung differenziert. Für eine mit Windstrom versorgte Elektrolyseeinheit werden im Falle einer zentralen Erzeugung Werte zwischen 3–8 €/kg $_{\text{H}_2}$ angegeben. Bei einer zentralen Einheit steigen die spezifischen Kosten auf bis zu 16 €/kg $_{\text{H}_2}$. Um die Tragweite der hier aufgezeigten ökonomischen Betrachtung zu verstärken, wird im Folgenden mit dem optimistischen Wert von 3 €/kg $_{\text{H}_2}$ gerechnet.

Abbildung 7 zeigt die Kostenuntergrenze der untersuchten Kraftstoffe in Abhängigkeit der spezifischen Produktionskosten des Wasserstoffs. Durch Einbeziehung des Heizwertes können darüber hinaus die energiespezifischen Kosten in € pro kWh eingezeichnet werden. Die Abbildung kann dabei auf zwei Wegen genutzt werden: 1.) Werden die spezifischen Produktionskosten des Wasserstoffs (€/kg) vorgegeben, so können die Kostenuntergrenzen der Kraftstoffe in €/kg bzw. €/kWh abgelesen werden. 2.) Werden die Zielkosten (Vorsicht: Kostenuntergrenze) des Kraftstoffs vorgegeben – beispielsweise in €/kWh – so können die geforderten Wasserstoffkosten bestimmt werden.

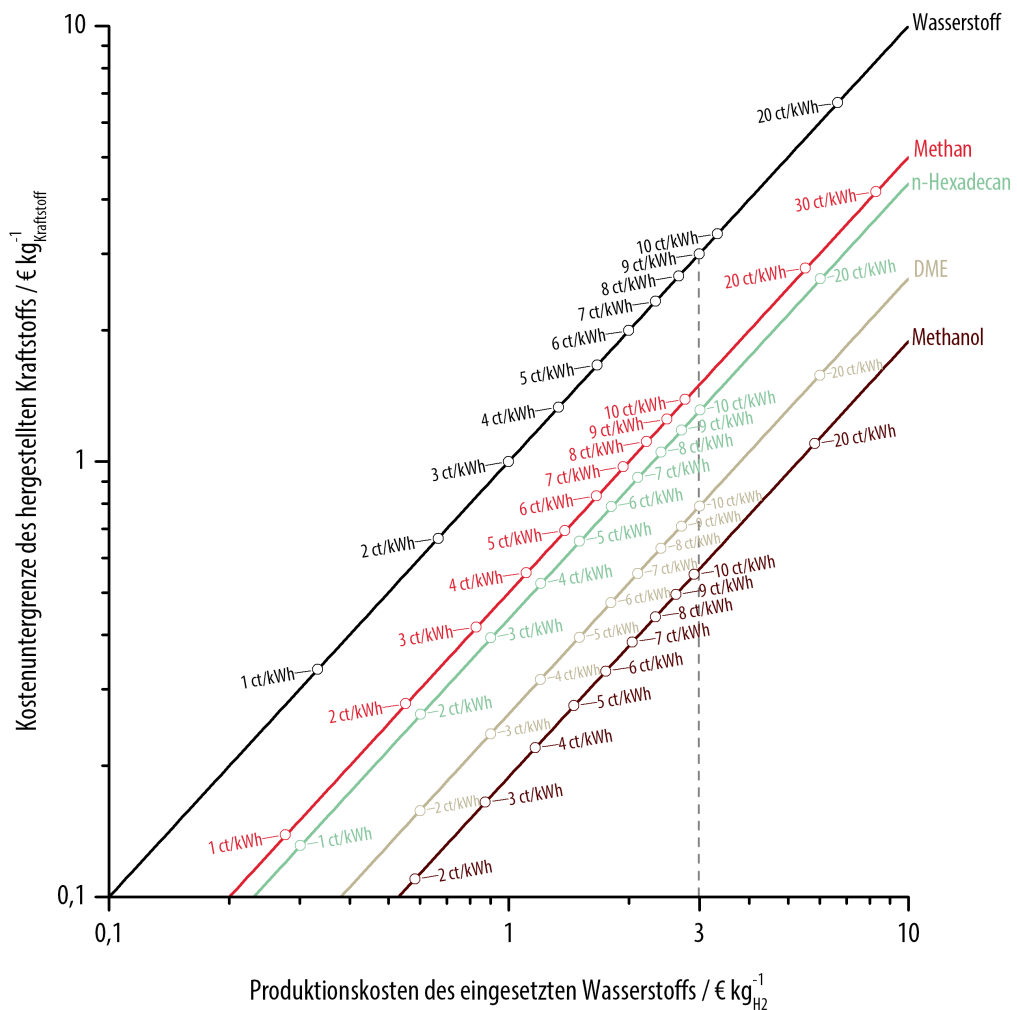


Abbildung 7: Kostenuntergrenze synthetisierter Kraftstoffe basierend auf den Produktionskosten des eingesetzten Wasserstoffs (Annahmen: keine Betriebs- und Investitionskosten der Anlagen, kostenneutraler Bezug von CO₂, stöchiometrische Synthese der Kraftstoffe)

Bei den angenommenen Wasserstoffentstehungskosten von 3 €/kg_{H₂} ergeben sich allein für die stoffliche Kostenuntergrenze folgende Werte:

- Methan: 10,9 ct/kWh_{CH₄} bzw. 1,51 €/kg_{CH₄}
- Methanol: 10,3 ct/kWh_{Methanol} bzw. 0,57 €/kg_{Methanol}
- Dimethylether: 10,0 ct/kWh_{DME} bzw. 0,79 €/kg_{DME}
- n-Hexadecan: 10,0 ct/kWh_{n-Hexadecan} bzw. 1,31 €/kg_{n-Hexadecan}

Bei einem Vergleich dieser Grenzkosten mit aktuellen Rohstoffkosten sind große Diskrepanzen zu erkennen. So liegt der Preis des synthetisierten Methans (10,9 ct/kWh_{CH₄}) um einen Faktor >10 über den aktuellen Pipelinekosten von Erdgas (0,9 ct/kWh_{CH₄}) [32]. Mit Wasserstoffkosten von 3 €/kg_{H₂} ist somit kein Geschäftsmodell für regeneratives Methan

⁷ 2,6 €/MMBtu ≈ 0,9 ct/kWh

zu generieren. Anders ausgedrückt: um synthetisiertes Methan zu Preisen von fossilem Erdgas bereitzustellen, dürfen die spezifischen Wasserstoffkosten einen Wert von $0,3 \text{ €/kg}_{\text{H}_2}$ nicht überschreiten. Bei einem sehr optimistischen Elektrolysewirkungsgrad von 70 % und einer Negierung der Investitionskosten müsste der eingesetzte Strom für einen Preis unter $0,6 \text{ ct/kWh}_{\text{el}}$ bereitgestellt werden. Dies erscheint nicht als realistisches Szenario (vgl. [31]). Im Falle von Methanol ergibt sich ein ähnlicher Sachverhalt. Im 2. Quartal des Jahres 2017 wird Methanol mit $405 \text{ €/t}_{\text{Methanol}}$ gehandelt [33]. Der Preis für das unter obigen Annahmen synthetisierte Methanol beträgt $570 \text{ €/t}_{\text{Methanol}}$. Um die Möglichkeit eines Geschäftsmodell zu schaffen, müsste der Wasserstoff für die Synthese somit zu Kosten von maximal $2 \text{ €/kg}_{\text{H}_2}$ bereitgestellt werden.

Diese Ausführungen und Zahlenbeispiele zeigen, dass selbst bei einer Negierung der CO_2 -Bereitstellungskosten sowie der Betriebs- und Investitionskosten der Anlagen und den angenommenen H_2 -Bereitstellungskosten von $3 \text{ €/kg}_{\text{H}_2}$ eine Konversion von H_2 zu alternativen Energieträgern (auf stofflicher Ebene) nicht ökonomisch darstellbar ist. Damit ist die Wandlung des teuren Wasserstoffs in keine andere und billige Energieform möglich, er muss als Wasserstoff eingesetzt werden.

3.2 Energetischer Vergleich: stoffliche Gegenüberstellung

Die Bewertung von Energie Tragenden Stoffen wird in der Regel anhand der Energiedichte (gravimetrisch und volumetrisch) durchgeführt. Für einen validen Vergleich ist jedoch auch die Herstellung (Konversion), die Speicherung bzw. Speicherverluste sowie die finale Umwandlung in die gewünschte Zielenergieform zu berücksichtigen. Im Falle der hier betrachteten Kraftstoffe ist dabei die Konversionskette ausgehend von der regenerativen Energie bis zur Antriebsenergie zu analysieren.

Da es in der Regel viele Varianten zur Überführung der Energieträger in eine speicherbare (handhabbare) Form gibt, ist der dazu notwendige Energiebedarf nicht pauschal für einen Kraftstoff zu ermitteln. Vielmehr müssen hierzu bereits sehr detaillierte Betrachtungen durchgeführt werden die beispielsweise die Temperatur, den Druck und die Dauer der Speicherung berücksichtigen. Ist zunächst eine sehr allgemeingültige Gegenüberstellung der oben genannten Diesel-Alternativen angestrebt, so können zwei aussagekräftige Kennzahlen ermittelt werden:

1. Spezifischer (stofflicher) Strombedarf für die Synthese, Einheit $\text{kWh}_{\text{el}}/\text{kg}_{\text{Kraftstoff}}$
Hierbei wird die zur Bereitstellung des Wasserstoffs und des Kohlenstoffdioxids notwendige Strommenge bilanziert. Ersterer wird über den Elektrolysewirkungsgrad, dem Bedarf an Wasserstoff sowie dessen Heizwert ermittelt. Für die Bereitstellung von CO_2 wird ein Wert von $2,28 \text{ kWh}_{\text{el}}/\text{kg}_{\text{CO}_2}$ angenommen [34] (ZSW Prozess: Absorption + Elektrodialyse, vgl. auch [35]).
2. Spezifischer Kraftstoffverbrauch, Einheit $\text{kg}_{\text{Kraftstoff}}/(100 \text{ kWh}_{\text{mech}})$
Der spezifische Kraftstoffverbrauch wird über die Heizwerte der Kraftstoffe und dem Wirkungsgrad des jeweiligen Antriebsstrangs bestimmt. Für Wasserstoff wird dabei zum einen der Wasserstoffverbrennungsmotor und zum anderen die Einheit aus Brennstoffzelle und Elektromotor berücksichtigt. Im Falle von Methan, Dimethylether und Fischer-Tropsch-Diesel wird ein Verbrennungsmotor verwendet. Methanol kann hingegen mit einer Direktmethanolbrennstoffzelle und einem Elektromotor zum

Antrieb eingesetzt werden. Die Annahmen für die Teilwirkungsgrade sowie der Energiedichten sind der Literatur entnommen.

Mit diesen beiden Kennzahlen lässt sich folglich ermitteln, wie viel erneuerbare Energie für die Bereitstellung der Ausgangsstoffe für die Synthese aufgebracht werden muss und wie viel Kraftstoff für eine vorgegebene Antriebsenergie im Fahrzeug benötigt wird. Der Energieaufwand für die Kraftstoffdistribution sowie zur Überführung des Stoffes in einen handhabbaren Zustand bleibt hier unberücksichtigt. Aus dem Produkt der beiden Kennzahlen lässt sich schließlich der Quotient aus eingesetzter elektrischer Energiemenge und bereitgestellter Antriebsenergie ermitteln. Der Kehrwert ergibt eine Art Wirkungsgrad, der hier als $\eta_{WTW\text{-stofflich}}$ bezeichnet wird und die Prozentzahl der initial eingesetzten Energie angibt, die nach der Konversion noch als Antriebsenergie zur Verfügung steht⁸. Alle Kraftstoffe und Antriebssysteme wurden hinsichtlich dieser Kriterien evaluiert. Die Ergebnisse sind in **Abbildung 8** dargestellt. Der spezifische Kraftstoffbedarf ist dabei auf eine Antriebsenergie von 100 kWh_{mech} bezogen.

Der Abbildung ist zu entnehmen, dass die unterschiedlichen Energieträger stark abweichende spezifische Strombedarfe und spezifische Verbräuche aufweisen. Vereinfachend ist zu sagen, dass ein geringerer Energiebedarf bei der Synthese in einem höheren Kraftstoffbedarf resultiert und umgekehrt. So ergibt sich beispielsweise für Methanol und mit bei einer Direktmethanolbrennstoffzelle ($\eta_{BZ, \text{Methanol}} = 37\%$ [36]) ein spezifischer Kraftstoffbedarf von circa 57 kg_{Methanol}/100 kWh_{mech}. Für die Bereitstellung der stöchiometrischen Menge von H₂ und CO₂ bei der Methanolsynthese sind 11,9 kWh_{el}/kg_{Methanol} notwendig. Somit müssen für 1 kWh_{mech} Antriebsenergie circa 6,8 kWh_{el} eingesetzt werden, was einem Strom-zu-Antriebsenergie Wirkungsgrad $\eta_{WTW\text{-stofflich}}$ von circa 15 % entspricht. Analoge Betrachtungen sind auch für Wasserstoff, Methan, Dimethylether sowie FT-Diesel durchführbar.

Der hohe Wirkungsgrad der H₂-Brennstoffzelle ($\eta_{BZ, H_2} = 55\%$ [37]) in Kombination mit der großen gravimetrischen Energiedichte von circa 33 kWh/kg_{H₂} ermöglicht einen geringen spezifischen Verbrauch von 6,1 kg_{H₂}/100 kWh_{mech}. Die zur Synthese notwendige elektrische Energie beträgt dabei 46,3 kWh_{el}/kg_{H₂}. Demnach sind circa 2,8 kWh_{el} notwendig, um Antriebsenergie von 1 kWh_{mech} auf die Straße zu bringen. Im Sinne des definierten Strom-zu-Antriebsenergiestromwirkungsgrads $\eta_{WTW\text{-stofflich}}$ ergibt sich somit ein Wert von circa 36 %. Aufgrund des geringeren Wirkungsgrads eines Wasserstoffverbrennungsmotors ($\eta_{Motor, H_2} = 42\%$ [38]) sinkt der Gesamtwirkungsgrad in diesem zweiten Wasserstoff-Szenario auf circa 30 % und liegt damit nicht-unwesentlich unterhalb der Brennstoffzellenvariante. Nichtsdestotrotz kann argumentiert werden, dass sich die Wasserstoffnutzungsvarianten unter den getroffenen Annahmen deutlich von den anderen Kraftstoffalternativen absetzen (FT-Diesel: $\eta_{WTW\text{-stofflich}} = 20\%$, Dimethylether: $\eta_{WTW\text{-stofflich}} = 17\%$, Methan: $\eta_{WTW\text{-stofflich}} = 16\%$, Methanol $\eta_{WTW\text{-stofflich}} = 15\%$).

⁸ Die genutzte Abkürzung *WTW-stofflich* soll verdeutlichen, dass es sich um eine Well-to-Wheel Analyse auf rein stofflicher Ebene handelt. Der Energieaufwand zur Speicherung oder Konversion des jeweiligen Stoffes sind nicht berücksichtigt.

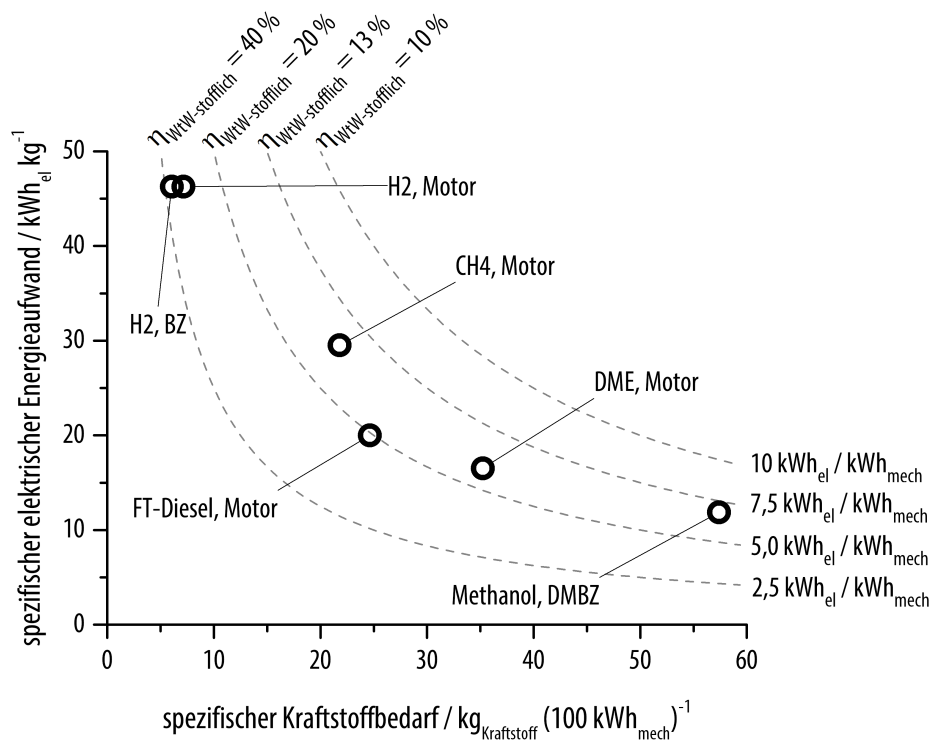


Abbildung 8: Vergleich alternativer Kraftstoffe unter den Gesichtspunkten des elektrischen Energieaufwands für die Bereitstellung der Synthese-Edukte und des spezifischen Kraftstoffbedarfs (fahrzeugseitig)

Wirkungsgrade: $e_{\text{CO}_2\text{-Bereitstellung}} = 2,28 \text{ kWh}_{\text{el}}/\text{kg}_{\text{CO}_2}$ [34], $\eta_{\text{Elektrolyse}} = 70\%$ [39],

$\eta_{\text{Motor, Diesel}} = 40\%$ [40], $\eta_{\text{Motor, DME}} = 40\%$ (Annahme), $\eta_{\text{Gasmotor, CH}_4} = 33\%$ [41], $\eta_{\text{Gasmotor, H}_2} = 42\%$ [38], $\eta_{\text{BZ, H}_2} = 55\%$ [37],

$\eta_{\text{BZ, Methanol}} = 37\%$ [36], $\eta_{\text{Elektromotor}} = 90\%$ [42]

Heizwerte: $LHV_{\text{H}_2} = 33,3 \text{ kWh}/\text{kg}_{\text{H}_2}$ [39], $LHV_{\text{CH}_4} = 13,89 \text{ kWh}/\text{kg}_{\text{CH}_4}$ [39], $LHV_{\text{DME}} = 7,94 \text{ kWh}/\text{kg}_{\text{DME}}$ [43],

$LHV_{\text{n-Hexadecan}} = 13,12 \text{ kWh}/\text{kg}_{\text{n-Hexadecan}}$ [44], $LHV_{\text{Methanol}} = 5,53 \text{ kWh}/\text{kg}_{\text{Methanol}}$ [29]

3.3 Speicherung von Wasserstoff: die Herausforderung

Sowohl die ökonomische Analyse als auch die energetische Bilanzierung zeigen, dass die direkte Nutzung von Wasserstoff als Kraftstoff große Vorteile gegenüber Methan, Methanol, FT-Diesel oder Dimethylether aufweist.

Insbesondere die eher optimistischen Annahmen für die obigen Evaluierungen müssen an dieser Stelle nochmals hervorgehoben werden: Weder die Investitions- und Betriebskosten der im Falle von Methan, Methanol, FT-Diesel oder Dimethylether zusätzlich notwendigen Synthesenanlagen noch der Energieaufwand zur (teils) komplexen Stofftrennung nach der Synthese wurde berücksichtigt. Darüber hinaus ist ein wasserstoffbasierter Antrieb der einzige, der sowohl global als auch lokal emissionsfrei gestaltet werden kann. Zudem ist eine ausreichend dimensionierte Kohlenstoffquelle nicht nur nicht verfügbar, sondern auch in Zukunft schwer denkbar. Während CO₂ aus Biomasse/-gas aufgrund des geringen Potenzials und der Verunreinigung durch diverse Gase von vornherein ausscheidet, bleibt die Frage nach der tatsächlichen Realisierbarkeit der CO₂-Abscheidung aus der Atmosphäre bislang ungeklärt. Argumentationen, die diesen Pfad dennoch befürworten, lassen in der Regel die hierbei zu berücksichtigende Dimension und den Energieaufwand derartiger Anlagen außer Acht: Im Falle von Methan müssten für eine stöchiometrische Synthese und 1 TWh_{mech} Antriebsenergie circa 0,6 Mio. t_{CO2} abgetrennt werden, wenn ein Gasmotor mit einem Wirkungsgrad von $\eta_{\text{Gasmotor, CH}_4} = 33\%$ [41] zum Einsatz kommt. Skaliert auf die aktuell im Verkehr notwendige Antriebsenergie von 210 TWh_{mech} (s.o.) ergeben sich 126 Mio. t_{CO2}, die jährlich aus der Atmosphäre abgeschieden werden müssten. Dies erscheint sowohl nach dem aktuellen Stand als auch für die Zukunft als kein realisierbarer Ansatz. Ungeachtet des Bauvolumens derartiger Anlagen würde allein der Energiebedarf der CO₂-Abscheidung (2,28 kWh_{el}/kg_{CO2} [34]) eine jährliche Strommenge von circa 290 TWh_{el} erfordern.

In allen bisher aufgeführten Argumentationen wurden jedoch die fahrzeugseitigen und infrastrukturellen Anforderungen an den Energieträger außer Acht gelassen. Dass diese eine wesentliche Rolle spielen wurde bereits in Kapitel 2.4 erläutert. Hierbei sind primär die volumetrische Speicherdichte des Kraftstoffs (gekoppelt mit der Effizienz der fahrzeugseitigen Umwandlung in Antriebsenergie) sowie die Benutzerfreundlichkeit bei dem Umgang mit dem Energieträger zu nennen. Letztere ist maßgeblich durch das Umweltgefährdungspotenzial und somit durch die Restriktionen bei der Lagerung und dem Transport des Kraftstoffs geprägt. Dazu kommen weitere Aspekte wie beispielsweise die spezifische Tankzeit. Die Kernfrage ist also welcher Aufwand betrieben und welche Kompromisse eingegangen werden müssen, damit wasserstoffbasierte Antriebskonzepte diesen Anforderungen standhalten.

Elementarer Wasserstoff weist eine große gravimetrische Energiedichte von 33,3 kWh_{th}/kg_{H₂} (vgl. Diesel 11,97 kWh_{th}/kg_{Diesel} [18]) auf. Durch den gasförmigen Zustand und die geringe Dichte wird bei Umgebungsbedingungen jedoch eine volumetrische Speicherdichte von lediglich 0,003 kWh_{th}/L_{H₂} (vgl. Diesel 9,96 kWh_{th}/L_{Diesel} (25 °C, 1 bar) [18]) erzielt. Das Volumen eines Tanks müsste äußerst groß sein, um relevante Energiemengen für einen Fernlastkraftwagen bereitzustellen. Der Vorteil des geringen spezifischen Verbrauchs von Wasserstoff (vgl. **Abbildung 8**) würde somit keinen Nutzen mehr darstellen. Zur Steigerung der volumetrischen Energiedichte des elementaren Wasserstoffs gibt es zwei weit verbreitete Ansätze:

- » Druckerhöhung – Druckwasserstoff
- » Temperaturniedrigung – Flüssigwasserstoff

Gängige Bedingungen für Druckwasserstoff liegen bei 350 oder 700 bar. Dabei werden volumetrische Energiedichten von 0,8 bzw. 1,3 kWh_{th}/L_{H₂} erzielt [45]. Bei einer weiteren Verdichtung spielt das nicht-ideale Verhalten des Wasserstoffs eine zunehmende Rolle, sodass das spezifische Volumen (und damit die volumetrische Energiedichte) nicht proportional zur Druckerhöhung zunimmt. Der Energieaufwand steigt somit überproportional an. Im Falle von Flüssigwasserstoff wird Wasserstoff auf -253 °C abgekühlt, unterschreitet damit die Siedelinie und liegt im flüssigen Aggregatzustand vor. Hierbei wird eine Energiedichte von 2,4 kWh_{th}/L_{H₂} erzielt (bei 1 bar) [45]. Die Energiedichten dieser beiden Varianten liegen weit hinter den Werten von Diesel. Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass ein Drucktank (Auslegung: >700 bar) sowie ein Kryogentank durch die große Wandstärke bzw. Isolation erheblich komplexer konstruiert und voluminöser sind als gängige Dieseltanks. Zudem ist die Tankgeometrie nicht mehr frei wählbar. Wird der Tank also mit in die Berechnung der Speicherdichte einbezogen, so ergeben sich weitere Reduzierungen.

Für die Anwendung in der Mobilität erscheint der Einsatz von Flüssigwasserstoff nicht praktikabel. Sogenannte Boil-Off-Verluste – die Verdampfung des flüssigen Wasserstoffs aufgrund nicht vermeidbarer Wärmezufuhr – können nur durch eine enorme Isolation reduziert und/oder durch eine (permanente) Kühlung des Tanks vermieden werden. Die Realisierung einer derartigen Tankkonstruktion für Schwerlast-LKWs ist fraglich. Nichtsdestotrotz kann Flüssigwasserstoff im Rahmen einer Wasserstoffinfrastruktur durch die verhältnismäßig hohe Speicherdichte sinnvoll eingesetzt werden.

Druckwasserstoff ist grundsätzlich für den Einsatz als Kraftstoff für Schwerlast-LKWs geeignet. Für die Kompression des Wasserstoffs von 5 auf 900 bar gibt Linde einen Energiebedarf von 2,7 kWh_{el}/kg_{H₂} [46] an. Das Druckniveau von 900 bar ist notwendig, um einen Druckgradienten⁹ bei der Betankung herzustellen [19]. Verglichen mit dem Energiebedarf der Wasserstoffbereitstellung mittels Elektrolyse von 47,6 kWh_{el}/kg_{H₂} ($LHV_{H_2} = 33,3$ kWh/kg_{H₂} [39], $\eta_{\text{Elektrolyse}} = 70$ % [39]) ist dieser Aufwand jedoch (verschwindend) gering. Eine wesentliche Abweichung zu den in Kapitel 3.2 ermittelten Werten ist somit nicht zu erwarten. Gegenüber Diesel weist Wasserstoff bei einem Druckniveau von 700 bar allerdings eine um den Faktor 8 geringere volumetrische (thermische) Energiedichte auf (bezogen auf das spezifische Volumen). Trotz des hohen Wirkungsgrads der H₂-Brennstoffzelle (in Kombination mit einem Elektromotor) ist dieser Nachteil nicht mehr auszugleichen. Abbildung 9 verdeutlicht diesen Zusammenhang. Hierbei ist die (stoffliche) thermische Energiespeicherdichte (Heizwert) gegen die effektive gespeicherte Antriebsenergie (mechanische Energie) aufgetragen. Als Referenz wird ein Volumen von 10 L angenommen. Es zeigt sich, dass unter Einbeziehung der fahrzeugseitigen Konversion des Energieträgers in Antriebsenergie circa 40 kWh_{mech}/10 L_{Diesel} bei Diesel und 6,5 kWh_{mech}/10 L_{H₂} bei Wasserstoff angegeben werden können. Demnach wird unter Annahme gleicher Tankvolumina (maximal 1.500 L) die Reichweite eines druckwasserstoffbasierten Antriebstrangs nur circa 16 % der eines mit Diesel betriebenen LKWs betragen (Faktor 6).

⁹ Es ist davon auszugehen, dass die Tankstelle den Wasserstoff mit circa dem 1,25-fachen Druck bevorraten muss, um die Betankung mit 700 bar durchzuführen.

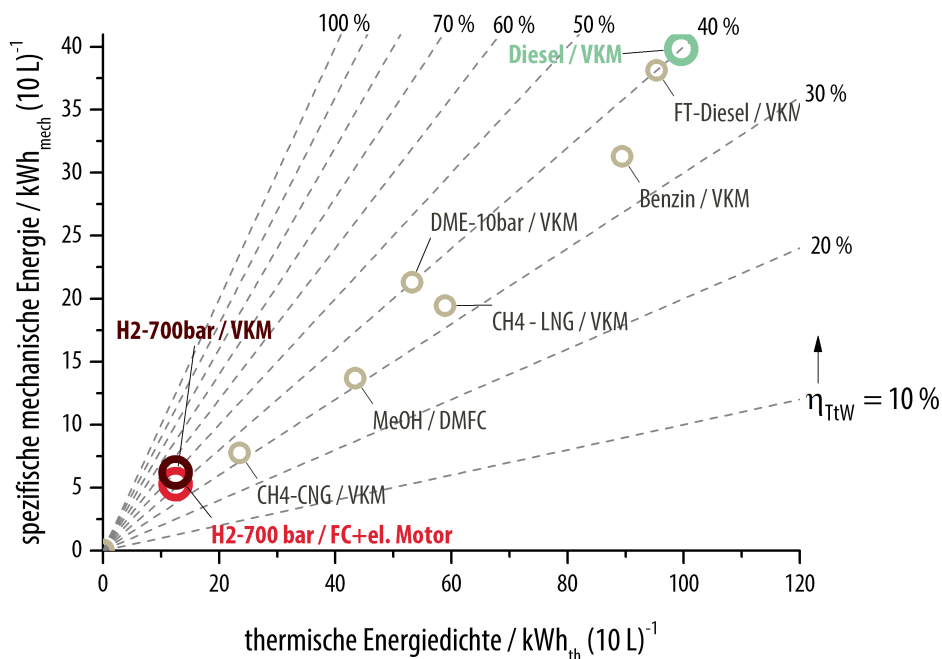


Abbildung 9: Vergleich alternativer Kraftstoffe unter den Gesichtspunkten der thermischen und mechanischen Speicherdichte¹⁰

Wird diese reduzierte Reichweite im Kontext eines emissionsfreien und effizienten Antriebskonzeptes als Kompromiss gewertet, so ergeben sich bei dem Einsatz von elementarem Druckwasserstoff als Kraftstoff für den Schwerlastverkehr dennoch gewisse fahrzeugseitige sowie infrastrukturelle Hindernisse und Bedenken.

» Sicherheit

Gemische aus Wasserstoff und Luft sind durch sehr weite Zündgrenzen geprägt. In Kombination mit einer geringen Zündenergie sowie hohe Diffusionskoeffizienten ist ein teils hoher Aufwand zu betreiben, um elementaren Wasserstoff sicher zu lagern und zu transportieren [38, 47]. Zwar sind diese sicherheitsrelevanten Aspekte technisch gut beherrschbar, jedoch können durch den nicht unerheblichen Aufwand hohe Kosten entstehen. Darüber hinaus bringt die Speicherung von Gasen unter hohen Drücken von Natur aus ein Gefahrenpotenzial mit sich. Regelmäßige Überprüfungen des Druckbehälters sowie aller Ventile und Verschraubungen sind zwingend notwendig um den ungewünschten Austritt von Wasserstoff zu vermeiden. Ungeachtet der Gefahr von Verkehrsunfällen resultieren aus den fahrzeugseitigen mechanischen und thermischen Belastungen (Vibrationen und Temperaturschwankungen) große Herausforderungen an die Konzeptionierung eines Druckwasserstofftanks für die Fahrzeuge. Als Preis eines 45 kg_{H2} (700 bar) Tanks werden ca. 45.000 € heute genannt [48].

» Materialverträglichkeit

Der hohe Diffusionskoeffizient von Wasserstoff bewirkt eine Permeation durch eine Vielzahl an Materialien (beispielsweise Polymere). Zwar ist die Permeation bei Stahltanks gering, jedoch kann es zu einer

¹⁰ Mit η_{TtW} wird der *tank to wheel* Wirkungsgrad (kurz: TtW) bezeichnet. Dieser steht für die fahrzeugseitige Wandlung der im Kraftstoff gespeicherten Energie in Antriebsenergie.

Versprödung und damit zu einer Abnahme der Zugfestigkeit kommen. Darüber hinaus kann ionisierter Wasserstoff in Metalle diffundieren und sich darin einlagern (lösen). Konsequenz ist, dass es zur Bildung von Rissen und somit zu Leckagen bzw. erheblichen Sicherheitsbedenken kommen kann [49]. Um diese Phänomene zu vermeiden werden heute händisch gefertigte Kohlefasertanks eingesetzt, die nach aktuellem Stand der Technik einen enormen Kostennachteil aufweisen.

» Benutzerfreundlichkeit (Tankzeit)

Eine weitere Besonderheit von Wasserstoff ist der negative Joule-Thomson-Effekt. Dies hat zur Folge, dass sich Wasserstoff in bestimmten Druckbereichen bei einer Drosselung erwärmt und bei der Kompression abkühlt. Da es bei einem Betankungsvorgang in der Regel zu einer Drosselung kommt (Druckgradient), besteht die Gefahr, dass der fahrzeugseitige Druckwasserstofftank bzw. die Zapfsäule Schaden durch eine Überhitzung nimmt. Um dies zu vermeiden, wird Wasserstoff an der Tankstelle unterkühlt gelagert (-33...40 °C [30]). Um die Druckanstiegsrate im Tank moderat zu gestalten, sind der maximalen Füllgeschwindigkeit gewisse Grenzen auferlegt. Für einen 350 bar Drucktank sind in der Literatur maximale Betankungsraten von 60 g_{H₂}/s beschrieben. Wird diese Geschwindigkeit auf einen LKW mit einem maximalen Tankvolumen von 1.500 L (entsprechend 58 kg_{H₂}) übertragen, so ergeben sich Tankzeiten von circa 16 Minuten.

» Infrastruktur und Kosten

Ein weiterer Aspekt ist die Vereinbarkeit der Nutzung von Druckwasserstoff mit der aktuellen Kraftstoff-Infrastruktur. Aufgrund der obigen Sicherheitsfragen sowie der erläuterten Materialverträglichkeit ist anzunehmen, dass die Nutzung von Druckwasserstoff als Kraftstoff eine vollständig neue Infrastruktur bedarf. Studien kalkulieren drei bis viermal so hohe Kosten einer Druckwasserstofftankstelle im Vergleich zu einer herkömmlichen Tankstelle [30]. Die Kosten setzen sich dabei aus den Investitionskosten für den Kompressor (43 %), den Druckspeicher (20 %) sowie für die Regelung/Sicherheitstechnik (16 %) zusammen [50]. Die absoluten Investitionskosten liegen laut einer amerikanischen Studie zwischen 3.000 und 15.000 \$ pro täglich bereitgestelltem Kilogramm Wasserstoff [28, 51]. Eine deutsche Wasserstoff-Tankstelle soll heute etwa 1 bis 1,5 Mio. € kosten [52].

Zudem ist die Belieferung von Tankstellen ein nicht zu unterschätzendes Problem. Nimmt man an, dass ein Schwerlastkraftwagen 100 kg H₂ tanken will und dass ein Sattelschlepper Druckwasserstoff zwischen 300 und 500 kg anliefert, so muss in der Warteschlange vor der Tankstelle spätestens jeder sechste LKW ein Versorgungsfahrzeug sein, eine unrealistische Vorstellung (vgl. Kapitel 6.5).

Die breite Einführung einer Infrastruktur über Druckwasserstoff stößt auf Kostengrenzen, die sich aus dem Material der Speicher und Sicherheitsvorkehrungen ergeben. Die Versorgung kann auf keine existierende Infrastruktur zurückgreifen. Die Versorgung von Tankstellen mit Druckwasserstoff-Sattelschleppern führt zu irrationalen Transportfahrten. Um die zweifelsohne vorhandenen Vorteile von Wasserstoff zu nutzen, muss über alternative Transportformen nachgedacht werden.

4 LOHC - was ist darunter zu verstehen?

Die Abkürzung LOHC steht für *Liquid Organic Hydrogen Carrier* und bezeichnet ein flüssiges organisches Stoffsystem, das zur Speicherung von Wasserstoff eingesetzt werden kann. Die LOHC gehören zum Konzept der Energie-Tragenden-Stoffe (ETS). Kern der ETS ist die Tatsache, dass der Energie Tragende Stoff selbst nicht verbraucht wird, sondern in einem Versorgungskreislauf geführt wird, ähnlich dem Kasten und den Flaschen eines Bieres. Das LOHC-Konzept stellt somit eine Alternative zu Druck- bzw. Flüssigwasserstoff dar. Kernaspekt ist die chemische Bindung des Wasserstoffs an eine Trägersubstanz (genannt LOHC), ähnlich wie die von Wasserstoff an Sauerstoff in Wasser. Damit wird das Ziel verfolgt, die volumetrische Energiedichte zu erhöhen und gleichzeitig die Lagerung oder den Transport von elementarem Wasserstoff zu verhindern. In einem LOHC gibt es keinen frei verfügbaren molekularen Wasserstoff. Im Folgenden wird auf das Grundkonzept sowie dessen Geschichte, die derzeit präferierte Trägersubstanz sowie den aktuellen Stand der LOHC-Technologie eingegangen.

4.1 Grundkonzept

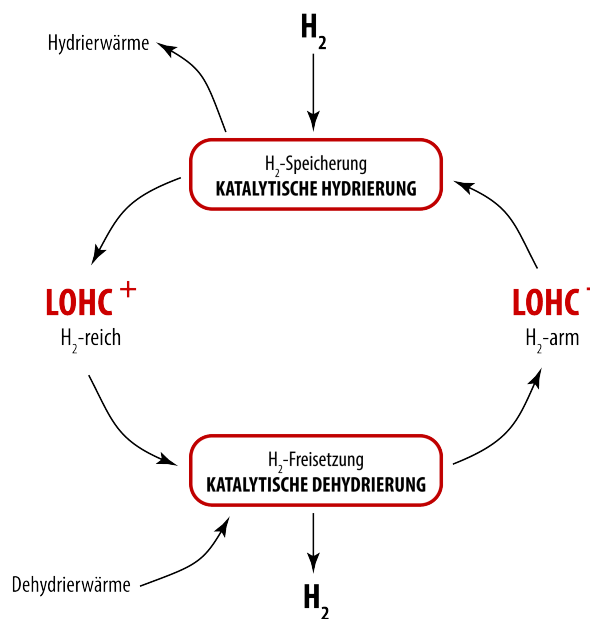


Abbildung 10: Grundprinzip der Speicherung von Wasserstoff in LOHCs

Die grundlegende Idee der LOHC-Technologie ist in **Abbildung 10** dargestellt. Elementarer Wasserstoff wird durch eine chemische Reaktion an eine flüssige organische Trägersubstanz gebunden (Hydrierung). Während dieses Schrittes muss es thermodynamisch zu einer Wärmefreisetzung (exotherme Reaktion) und einer Stoffmengenabnahme (H₂ wird gebunden) kommen. Demzufolge wird diese Hydrierreaktion bei tiefen Temperaturen und hohen Drücken

thermodynamisch begünstigt. Gleichzeitig ist ein spezifischer Katalysator notwendig, dessen Aktivität mit steigender Temperatur zunimmt [53]. Für den Ablauf der Reaktion sind somit definierte Reaktionsbedingungen (Temperatur, Druck) vorzugeben. Überschlüssig lässt sich sagen, dass Temperaturen über 180 °C und Drücke zwischen 10 und 30 bar notwendig sind. Der mit Wasserstoff beladene Träger wird mit LOHC⁺ bezeichnet. Dieser kann nun gelagert und/oder transportiert werden. Entscheidend ist, dass ohne einen geeigneten Katalysator sowie spezifische Reaktionsbedingungen der Wasserstoff nicht aus der Flüssigkeit befreit werden kann. Nur durch eine geeignete Wahl von Druck und Temperatur, einer konstanten Wärmezufuhr sowie der Zugabe eines Katalysators wird die Hydrierung rückgängig gemacht (Dehydrierung). Dabei wird der Trägerstoff selbst dehydriert und der Wasserstoff wieder freigesetzt. Die Dehydrierung findet in der Regel bei Drücken < 3 bar und Temperaturen über 200 °C statt. Um das geforderte Temperaturniveau aufrechtzuerhalten, ist kontinuierlich thermische Energie zuzuführen. Ideal betrachtet ist der Energiebedarf der Dehydrierung identisch mit der freigesetzten thermischen Energie während der Hydrierung. Ist die Dehydrierung abgeschlossen, so liegt das Trägermaterial in einem wasserstoff-armen Zustand vor. Es kann nun mit LOHC⁻ bezeichnet werden und steht für eine erneute Hydrierung zur Verfügung. Der Träger wird somit nicht verbraucht, sondern zyklisch mit Wasserstoff be- und entladen. Da drei Dinge für die Dehydrierung (Temperaturen > 200°C, Wärmezufuhr bei dieser Temperatur, spezieller Katalysator) notwendig sind, ist es kaum vorstellbar, dass Unbefugte aus einem LOHC⁺ Wasserstoff freisetzen, immerhin sind in 1 L LOHC etwa 700 L Wasserstoff bei Umgebungsbedingungen vorhanden.

Als wesentliche Bewertungskriterien der LOHCs können folgende Eigenschaften formuliert werden [53, 54]:

- » **Toxizität**
Der LOHC sollte nicht toxisch sein und der Einsatz keine gravierenden Sicherheitsprobleme nach sich ziehen. Vorzugsweise ist der Träger absolut unbedenklich, im Sinne eines Kraftstoffs könnte man jedoch als Benchmark die Toxizität konventioneller Energieträger wie Benzin oder Diesel heranziehen.
- » **Handhabbarkeit**
Der LOHC sollte bei Umgebungsbedingungen als Flüssigkeit vorliegen. Substanzen die bei Umgebungstemperatur gasförmig sind, müssten unter Druck gelagert werden um die Dichte zu erhöhen und das Volumen des Speichertanks zu reduzieren. Dies zieht jedoch sicherheitstechnische Fragen nach sich. LOHCs die bei Umgebungstemperatur als Feststoff vorliegen können nicht gepumpt werden was die Förderung des Trägers enorm verkompliziert. Die Erfahrung mit CNG-betriebenen Fahrzeugen zeigt, dass die Mobilität bevorzugt flüssig versorgt wird.
- » **Temperaturstabilität**
Im Rahmen der im Prozess verwendeten Temperaturen muss der LOHC sowohl auf stofflicher Ebene als auch hinsichtlich der flüssigen Phase stabil sein. Das bedeutet, es darf zu keiner Zersetzung kommen und der Dampfdruck muss hinreichend gering sein, so dass bei erhöhten Temperaturen keine Verdampfung stattfindet. Das erleichtert eine hohe Reinheit des freigesetzten Wasserstoffs. Zudem wird die Belastung der Luft deutlich reduziert.
- » **Hydrier- und Dehydrierbarkeit**
Grundsätzlich ist durch eine gezielte Wahl der Reaktionsbedingungen stets eine Hydrierung und Dehydrierung möglich. Allerdings müssen für eine sinnvolle Anwendung des LOHCs die Umsätze der Reaktionen in einem technisch relevanten Maßstab ablaufen. Thermodynamisch stellt die Hydrierung in der Regel kein Problem dar. Um eine wesentliche Triebkraft für die Dehydrierung zu generieren, benötigen einige potenzielle LOHCs

jedoch teils harsche Bedingungen. Die Freisetzung des Wasserstoffs ist in diesen Fällen oft mit einer (irreversiblen) chemischen Zersetzung des LOHCs oder dessen Verdampfung verbunden.

» **Speicherichte**

Die gravimetrische Speicherichte ist primär von dem Verhältnis der hydrierbaren Doppelbindungen sowie der molaren Masse des LOHC-Moleküls abhängig. Für die volumetrische Speicherichte ist zudem eine möglichst hohe Dichte der Substanz wünschenswert. Diese beiden Kennzahlen sind entscheidend für die Vorauswahl potenzieller LOHCs.

» **Preis**

Selbstverständlich muss der Preis für die Trägersubstanz möglichst gering sein. Hierbei ist jedoch zu bedenken, dass der LOHC zyklisch be- und entladen wird. Er steht somit nach der Entladung erneut für die Aufnahme von Wasserstoff bereit. Demzufolge darf der Preis des LOHCs nicht mit konventionellen Kraftstoffen verglichen werden. Finanztechnisch gehört ein LOHC zu den Investitionen. Vielmehr müssen die spezifischen Kosten pro gespeicherter Energiemenge zum Vergleich herangezogen werden.

4.2 Entwicklungsschritte einer alten Idee

Die reversible Hydrierung von Kohlenwasserstoffen zur Speicherung von Wasserstoff (Ziel: Energiespeicherung) wurde erstmals im Jahr 1968 in einer Patentanmeldung diskutiert [55]. Im Speziellen wurde hierbei auf die Substanzen Benzol/Cyclohexan sowie Toluol/Methylcyclohexan eingegangen. Letztere wurde seit den 1970er Jahren auch in der Wissenschaft diskutiert [56, 57].

Schon hier zeigte sich, dass aromatische Moleküle (im dehydrierten Zustand) eingesetzt werden müssen, um die Bedingungen für die Dehydrierung moderat zu halten. Bezogen auf obige Anforderungen an einen LOHC schneidet Toluol bis auf die Aspekte der Dehydrierbarkeit (hohe Temperaturen notwendig), Zersetzung und dem hohen Dampfdruck relativ gut ab. Exakt diese zwei Kriterien sorgen jedoch dafür, dass die Dehydrierung von Methylcyclohexan annähernd vollständig in der Dampfphase stattfindet. Konsequenz ist, dass der freigesetzte Wasserstoff von Toluol (LOHC) separiert werden muss.

Neben dem Einsatz als allgemeine Energiespeicheroption wurde dieses System in den 1980er Jahren auch als H₂-Träger für die Mobilität untersucht [58]. Dabei wurde an der ETH Zürich ein Prototyp konzipiert und aufgebaut. Der freigesetzte Wasserstoff wurde in einem Verbrennungsmotor zur Bereitstellung der Antriebsenergie eingesetzt [59]. Das Projekt kann sowohl als Erfolg als auch als Misserfolg gewertet werden: Zum einen wurde die grundlegende Machbarkeit dieses Ansatzes nachgewiesen und der LKW mit dem freigesetzten Wasserstoff angetrieben. Andererseits wurden nur sehr geringe Reichweiten erzielt. Gründe hierfür liegen zum einen in den harschen Temperaturen der Dehydrierung (400 °C und 11 bar) und den daraus resultierenden konstruktiven Herausforderungen (massive Bauweise), den bereits geschilderten Nachteilen dieses Stoffsystems sowie der geringen Leistungsdichte des Freisetzers. Das Projekt und die Forschung auf dem Gebiet der LOHC wurde im Anschluss bis heute nicht weiterverfolgt [60].

Im Jahr 2003 wurde schließlich die Verbindung N-Ethylcarbazol von der Firma Air Products & Chemicals vorgeschlagen [61]. Die Temperatur der Dehydrierung kann bei diesem System deutlich reduziert werden. Durch die wesentlich höhere molare Masse des Moleküls sinkt gleichzeitig der Dampfdruck und die Komplexität der Stofftrennung wird entscheidend reduziert. Basierend auf diesen Grundlagen stieg auch das Interesse der Wissenschaft an dem LOHC-Konzept (bspw.: [62-67]). Dabei wurde jedoch festgestellt, dass N-Ethylcarbazol zwei entscheidende Nachteile im

Kontext der Handhabbarkeit und Temperaturstabilität aufweist: 1.) Bei der Dehydrierung kommt es zu einer Reihe von Zersetzungsreaktionen. 2.) N-Ethylcarbazol liegt bei Umgebungsbedingungen als Feststoff vor [68]. Folglich ist weder die Zyklenstabilität noch die einfache Lagerung des beladenen LOHCs gewährleistet. Der Einsatz als Wasserstoffträger in der Mobilität wurde zwar diskutiert [69], jedoch nicht weiter verfolgt.

Im Jahr 2013 wurde schließlich von Wissenschaftlern der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg das LOHC-System Dibenzyltoluol/Perhydro-Dibenzyltoluol vorgeschlagen [70]. Zwar steigt die notwendige Dehydrieretemperatur erneut auf das Niveau von Toluol/Methylcyclohexan, allerdings wird durch die Zunahme der molaren Masse eine weitere Senkung des Dampfdrucks erzielt. Der Nachteil der hohen Temperatur für die Wasserstofffreisetzung wird somit durch eine gute Phasenstabilität kompensiert. Eine Verdampfung des Trägers findet nur in geringem Maße statt. Zudem zeigt das System im Vergleich zu N-Ethylcarbazol eine hohe chemische Stabilität und Zersetzungsreaktionen können nahezu vernachlässigt werden. Diese gehen nicht von der hohen Temperatur, sondern von der Wirkung des Katalysators aus. Hier kann durch weitere Katalyseforschung Abhilfe geschaffen werden. Sowohl Dibenzyltoluol als auch Perhydro Dibenzyltoluol können bei Umgebungsbedingungen im flüssigen Zustand gelagert werden. Die Stockung setzt erst bei Temperaturen $< -30\text{ °C}$ ein.

4.3 Favorisiertes Stoffsystem

Im Folgenden werden die Eigenschaften sowie die Reaktionsbedingungen des LOHCs Dibenzyltoluol/Perhydro-Dibenzyltoluol (DBT) erläutert.

4.3.1 Reaktionsbedingungen

Dibenzyltoluol stellt bei diesem System das wasserstoff-arme LOHC, Perhydro-Dibenzyltoluol hingegen das wasserstoff-reiche LOHC⁺ dar. Häufig werden hierfür auch die Bezeichnungen H0-DBT und H18-DBT verwendet. **Abbildung 11** zeigt schematisch den Vorgang der Wasserstoffspeicherung und -freisetzung. Pro Molekül H0-DBT können durch die exotherme Hydrierung 9 Mol Wasserstoff H₂ aufgenommen werden. Im vollhydrierten Zustand ist damit eine maximale Beladung von circa 6,2 Massenprozent mit Wasserstoff möglich (H18-DBT). Die Reaktion läuft dabei zwischen 150 und 300 °C bei einem Druck über 20 bar. Diese Bedingungen sind notwendig, um eine ausreichende thermodynamische Triebkraft für die Reaktion zu garantieren. Die freigesetzte thermische Energie beträgt circa 9 kWh_{th}/kg_{H₂} und muss abgeführt werden. Aufgrund des hohen Temperaturniveaus kann diese Wärme jedoch zu Heiz- oder Prozesszwecken sinnvoll eingesetzt werden. Das hydrierte LOHC⁺ kann anschließend bei Umgebungsbedingungen im flüssigen Zustand gelagert werden. Für die Dehydrierung von H18-DBT ist die gleiche Menge thermischer Energie zuzuführen wie die, die bei der Hydrierung freigesetzt wurde (9 kWh_{th}/kg_{H₂}). Im Vergleich zur Hydrierung muss jedoch eine höhere Temperatur und ein geringerer Druck vorherrschen. Pauschal können hierfür circa 250 bis 320 °C und Drücke < 3 bar angegeben werden. Während der Dehydrierung werden schließlich die initial eingespeicherten 9 Mol Wasserstoff H₂ wieder freigesetzt und das wasserstoff-arme H0-DBT gebildet. Damit ist der LOHC-Kreislauf geschlossen und eine erneute Hydrierung/Dehydrierung kann stattfinden.

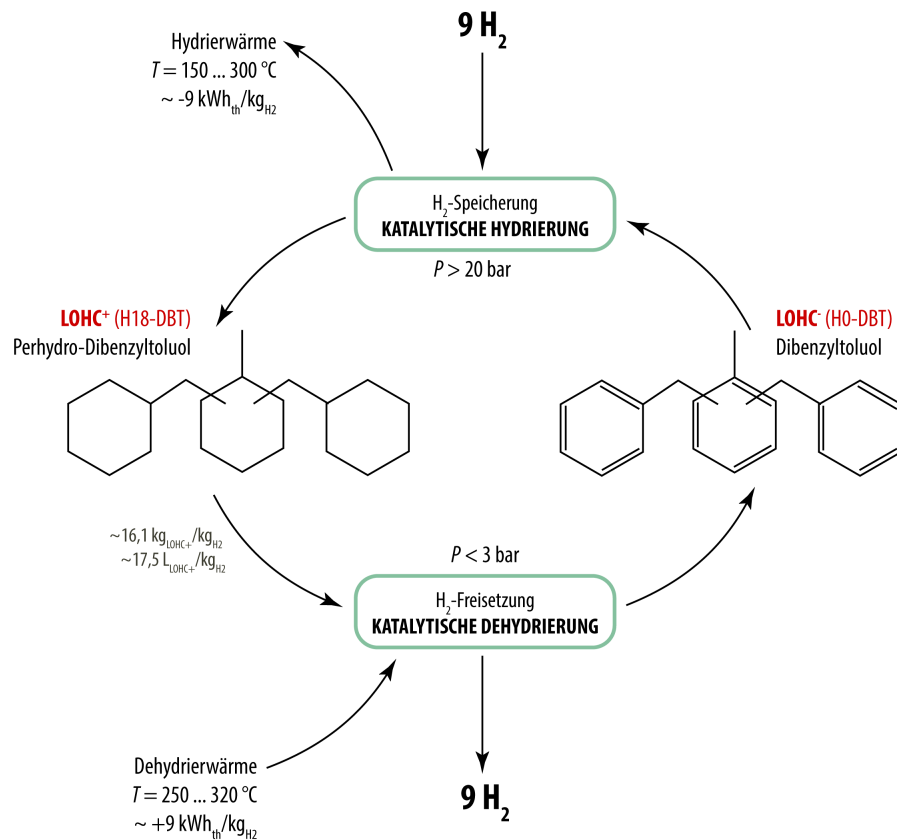


Abbildung 11: Konzept der Speicherung von Wasserstoff mit dem LOHC-System
 Dibenzyltoluol/Perhydro-Dibenzyltoluol (HO-DBT/H18-DBT)

Die Hydrierung erfolgt nicht in einem Schritt. Damit liegen verschieden hydrierte Stoffe und zudem sterische und optische Isomere in der Mischung vor. Diese können problemlos weiter hydriert oder dehydriert werden. Eine Methode zur Bestimmung des Hydriergrades der Mischung liegt vor [71].

4.3.2 Reaktor und Katalysator

Die Hydrierung von aromatischen Stoffen zu den entsprechenden Cycloalkanverbindungen ist seit Jahrzehnten ein großtechnisch eingesetztes Verfahren und findet in unterschiedlichen Bereichen Anwendung. Reaktoren für klein- und großskalige Anlagen können als Stand der Technik bezeichnet werden. Etablierte Hydrierkatalysatoren für aromatische Verbindungen nutzen Platin, Ruthenium, Rhodium, Nickel oder Kupfer als katalytisch aktive Metalle. Die Edelmetallkatalysatoren sind auf porösen Trägern in geringer Menge aufgebracht (typischerweise 0,3 – 5% Metallgehalt), die Nickel- und Kupfersysteme enthalten wesentlich höhere Metallgehalte.

Die Dehydrierung von Wasserstoff-beladenen LOHC-Systemen stellt spezielle Anforderungen an die Konzeptionierung der Reaktoren. Entscheidend ist hierbei, dass pro Liter H18-DBT bei einer Reaktionstemperatur von 300 °C circa 1070 L_{H₂} (1 bar, 300 °C) freigesetzt werden. Diesem enormen Gasvolumen muss das einfache Ausströmen aus der Reaktionszone

ermöglicht werden ohne dass die Verweilzeit der Flüssigkeit und ihr Kontakt mit dem Katalysator negativ beeinflusst werden. Für diesen Zweck sind beispielsweise Platten- oder Rohrbündelreaktoren geeignet, wobei grundsätzlich sowohl vertikale als auch horizontale Ausführungen verwendet werden können. Vertikale Ausführungen sind bezüglich dem Einfluss von Kippwinkeln und Beschleunigungen im Fahrbetrieb des LKWs als günstiger anzusehen.

Für die Dehydrierung können kommerzielle Katalysatoren eingesetzt werden. In der Regel handelt es sich dabei um Platin als katalytischem Stoff auf Aluminiumoxid oder Kohlenstoff als Trägersubstanzen. Allgemein ist die Reaktionsgeschwindigkeit vom LOHC-Durchfluss, der Reaktortemperatur, dem Reaktionsdruck und der Art und Menge des eingesetzten Katalysators abhängig. Die Leistungsregelung des Freisetzers kann somit durch eine Veränderung des LOHC-Massenstroms sowie durch eine Änderung der Reaktionsbedingungen erfolgen. Dabei führt eine Drucksenkung und eine Temperaturerhöhung zu einer gesteigerten thermodynamischen Triebkraft, was sich in höheren Freisetzungsraten widerspiegelt. Eine Erhöhung des Volumenstroms verringert bei gegebenem Reaktor und Katalysator zwar den Umsatz der Dehydrierung, jedoch kann es zu einer höheren Leistung kommen. Weitere Möglichkeiten und Grenzen der Leistungsregelung werden in Kapitel 7.1 beschrieben.

4.3.3 Stoffdaten

Während Dibenzyltoluol als Isomerengemisch von der Firma SASOL seit vielen Jahren kommerziell als Wärmeträgeröl [70, 72] vertrieben wird, ist Perhydro Dibenzyltoluol eine relativ neue Komponente. Im Kontext der Nutzung als LOHC sind beide Stoffe jedoch in den vergangenen Jahren detailliert untersucht und charakterisiert worden [70, 73-78]. Neben der temperaturabhängigen Dichte, Viskosität, Gaslöslichkeit, spezifischen Wärmekapazität und Oberflächenspannung sind der Dampfdruck, die Bildungsenthalpien und der Schmelzpunkt der Komponenten vermessen. Darüber hinaus wurden Korrelationen erstellt, die einen Zusammenhang zwischen dem Hydriergrad und den physikalischen Größen widerspiegeln. So ist beispielsweise nachgewiesen, dass der Brechungsindex direkt mit der Dichte korreliert und diese wiederum ein Maß für den Hydriergrad des LOHCs in dem Vielkomponentengemisch darstellt. Durch diese relativ einfach zugängliche messtechnische Größe kann der Energieinhalt (Wasserstoffgehalt) des LOHCs bestimmt werden.

Essentiell für die in diesem Bericht durchgeführte energetische Bilanzierung sind im Wesentlichen zwei Größen:

- » Spezifische Wärmekapazität
Für H0-DBT und H18-DBT kann hierbei von einem Wert von $1,57 \text{ kJ (kg}_{\text{H0-DBT}} \text{ K)}^{-1}$ bzw. $1,54 \text{ kJ (kg}_{\text{H18-DBT}} \text{ K)}^{-1}$ ausgegangen werden (298 K). Im Falle von H18-DBT kann die spezifische Wärmekapazität auch auf den Wasserstoffinhalt bezogen werden. Es ergibt sich ein Wert von $24,8 \text{ kJ/(kg}_{\text{H}_2} \text{ K)}$.
- » Reaktionsenthalpie der Hydrier- und Dehydrierreaktion
Die molare Reaktionsenthalpie beträgt $590 \text{ kJ/mol}_{\text{H18-DBT}}$. Greifbarer ist jedoch die Angabe bezogen auf die Masse des freigesetzten/gespeicherten Wasserstoffs. Hierfür ergibt sich ein Wert von circa $9,0 \text{ kWh}_{\text{th}}/\text{kg}_{\text{H}_2}$. Der Wert der Hydrier- und Dehydrierreaktion kann als identisch betrachtet werden.

Im Kontext des Einsatzes dieser Substanzen als Wasserstoffträger in der Mobilität sind zudem die Eigenschaften wie die Viskosität, der Siede- und Flammpunkt, die Entzündbarkeit, der Dampfdruck sowie die Wasserlöslichkeit von essentieller Bedeutung. Diese sicherheits- und handhabungsrelevanten Größen wurden im Rahmen der REACH Registrierung sowohl von H0-DBT als auch von H18-DBT bestimmt. Kernaussage der Registrierung ist, dass diese Substanzen nicht als Gefahrenstoff klassifiziert werden. Ein Auszug der Datenblätter der Firma Sasol und der Produkte *MARLOTHERM SH* (H0-DBT) [79] und *MARLOHC* (H18-DBT) [80] ist in nachfolgender **Tabelle 1** gelistet.

Tabelle 1: Auszug aus den Stoffdatenblättern von Dibenzyltoluol und Perhydro-Dibenzyltoluol [79, 80]

	H0-DBT	H18-DBT
Stoffname (REACH/CLP)	Dibenzyltoluene	dibenzylbenzene, ar-methyl derivative, hydrogenated
REACH Nr.	01-2119488667-17-0000	01-2120117074-69-0000
Handelsname	Marlotherm SH (DBT)	MARLOHC
Aggregatzustand	flüssig; 20 °C; 1.013 hPa	flüssig; 20 °C; 1.013 hPa
Form	flüssig	flüssig
Farbe	farblos bis gelb	klar
Geruch	sehr schwach	nach Kohlenwasserstoffen
Geruchsschwelle	Keine valide Methode verfügbar	keine valide Methode verfügbar
pH-Wert	nicht anwendbar	nicht anwendbar
Schmelzpunkt/Schmelzbereich	ca. -39 ... -32 °C; OECD Prüfrichtlinie 102	< -50 °C
Siedepunkt/Siedebereich	ca. 390 °C; 1.013 hPa	ca. 371 °C; 1.013 hPa
Flammpunkt	ca. 212 °C; Verordnung (EU) 440/2008; Methode A.9.	161 °C
Verdampfungsgeschwindigkeit	Keine Daten verfügbar	Keine Daten verfügbar
Entzündbarkeit (fest, gasförmig)	nicht anwendbar (Flüssigkeit)	nicht anwendbar (Flüssigkeit)
Untere Explosionsgrenze	Keine Daten verfügbar	Keine Daten verfügbar
Obere Explosionsgrenze	Keine Daten verfügbar	Keine Daten verfügbar
Dampfdruck	< 0,01 hPa; 20 °C; Verordnung (EU) 440/2008; Methode A.4	< 0,01 hPa; 20 °C
Relative Dampfdichte	> 1	> 1
Dichte	1,04 g/cm ³ ; 20 °C; OECD Prüfrichtlinie 109	0,921 g/cm ³ ; 20 °C
Wasserlöslichkeit	< 0,1 mg/l; 20 °C; Verordnung (EU) 440/2008; Methode A.6.	unlöslich
Verteilungskoeffizient: n-Octanol/Wasser	log P _{ow} > 6; 22 °C; OECD-Prüfrichtlinie 117	log P _{ow} > 7,5
Zündtemperatur	ca. 500 °C; Verordnung (EU) 440/2008; Methode A.15.	Keine Daten verfügbar
Selbstentzündungstemperatur		nicht selbstentzündlich
Viskosität, kinematisch	ca. 16 mm ² /s; 40 °C; DIN 51562	82 mm ² /s; 40 °C
Viskosität dynamisch	ca. 48 mm ² /s; 20 °C; DIN 51562	ca. 434 mPas; 20 °C
Explosive Eigenschaften	auf Grund der Struktur u. der funktionellen Gruppen nicht zu erwarten	auf Grund der Struktur und der funktionellen Gruppen nicht zu erwarten
Oxidierende Eigenschaften	auf Grund der Struktur und der funktionellen Gruppen nicht zu erwarten	auf Grund der Struktur und der funktionellen Gruppen nicht zu erwarten

4.3.4 Bereitstellung der Dehydrierwärme – Auswirkung auf Speicherdichte und Wirkungsgrad

Mit einer maximalen Beladung des LOHCs ergibt sich eine Wasserstoffspeicherdichte von $6,2 \text{ g}_{\text{H}_2}/\text{kg}_{\text{LOHC+}}$ bzw. $57,2 \text{ g}_{\text{H}_2}/\text{L}_{\text{LOHC+}}$. Mit Hilfe des Heizwertes von Wasserstoff ($33,3 \text{ kWh}_{\text{th}}/\text{kg}_{\text{H}_2}$) lässt sich die gravimetrische und volumetrische Energiespeicherdichte von $2,1 \text{ kWh}_{\text{th}}/\text{kg}_{\text{LOHC+}}$ bzw. $1,9 \text{ kWh}_{\text{th}}/\text{L}_{\text{LOHC+}}$ ermitteln. Diese Ergebnisse repräsentieren eine idealisierte Betrachtung. Real ist zum einen der Hydriergrad in die Bilanz einzubeziehen. Nur im Idealfall gelingt eine vollständige Hydrierung von H0-DBT auf H18-DBT, Spitzenwerte liegen über 99 %. Die Speicherdichte sinkt hierbei direkt proportional zum Hydriergrad. Zum anderen spielt die Art der Bereitstellung der Dehydrierwärme eine entscheidende Rolle. Dabei kann diese Wärme vollständig oder zu Teilen aus einer externen Quelle stammen. In Frage kommt hierbei eine verfügbare Abwärmequelle oder die Verbrennung eines sekundären Kraftstoffs (Dual-Fuel Konzept). Steht keine thermische Energie auf einem passenden Temperaturniveau zur Verfügung oder soll kein zweiter Kraftstoff eingesetzt werden, so kann eine systeminterne Lösung angedacht werden. Dabei wird ein Teil des freigesetzten Wasserstoffs einem Wasserstoffbrenner zugeführt. Die Menge an Wasserstoff wird so dosiert, dass die Verbrennung gerade den Wärmebedarf der Dehydrierung deckt.

In Summe können drei Szenarien formuliert werden, wobei die reale Anwendung zwischen je zwei dieser Fälle liegen wird:

1. Dehydrierung durch Abwärmequelle gespeist (*best case*)
Wenn davon ausgegangen wird, dass die notwendige Menge thermischer Energie auf dem entsprechenden Temperaturniveau „frei“ zur Verfügung gestellt wird, so wird der eingespeicherte Wasserstoff (ohne energetischen Verlust) 1:1 auch wieder freigesetzt (Annahme: Umsätze beider Schritte gleich). Ein zusätzlicher interner Energieaufwand ist nicht aufzubringen. Dieses Szenario kann als *best case* bezeichnet werden.
2. H18-DBT liegt bereits auf Reaktionstemperatur vor
In diesem Fall ist die Reaktionswärme von circa $9 \text{ kWh}_{\text{th}}/\text{kg}_{\text{H}_2}$ (vgl. Kapitel 4.3.1) zuzuführen. Dies kann intern beispielsweise über die Verbrennung eines Teils des freigesetzten Wasserstoffs erfolgen. Unter Berücksichtigung des Heizwertes von Wasserstoff ergibt sich dabei ein Anteil von 27 %, der somit nach dem Speichervorgang nicht mehr zur Verfügung steht und für die Bereitstellung der thermischen Energie verbrannt werden muss.
3. H18-DBT liegt auf Umgebungstemperatur vor (*worst case*)
Wurde H18-DBT für längere Zeit gelagert, so ist anzunehmen, dass es bei Umgebungstemperatur dem Freisetzer zugeführt wird. Die notwendige thermische Energie setzt sich in diesem Fall aus dem Energiebedarf zur Vorwärmung von H18-DBT auf Reaktionstemperatur sowie der eigentlichen Reaktionswärme zusammen. Daraus folgt, dass circa $12 \text{ kWh}_{\text{th}}/\text{kg}_{\text{H}_2}$ zugeführt werden müssen (Annahme: Dehydrierung bei $300 \text{ }^\circ\text{C}$). Bei einer systemgeschlossenen Lösung sind somit 36 % des freigesetzten Wasserstoffs für die Bereitstellung der Dehydrierwärme einzusetzen - für die eigentliche Anwendung stehen lediglich 64 % des initial eingespeicherten Wasserstoffs zur Verfügung. Dieses Szenario wird als *worst case* bezeichnet.

Der Unterschied der drei Szenarien liegt somit in dem effektiv nutzbaren Wasserstoffanteil. Für alle drei Fälle können nun die Energiespeicherdichte sowie der Wirkungsgrad ermittelt werden. Dabei wird an dieser Stelle von der Nutzung der Hydrierwärme abgesehen, da die Hydrierung in der Mobilität entfernt von der Freisetzung erfolgt. Zur Erhöhung des Gesamtwirkungsgrades des LOHC-Systems sollte die bei der Hydrierung freigesetzte thermische Energie (Temperaturniveau 150 ... 300 °C) selbstverständlich genutzt werden. Die Ergebnisse sind in **Tabelle 2** gelistet.

Tabelle 2: Speicherdichte und Effizienz von DBT (H18-DBT) für unterschiedliche Bereitstellungsszenarien der Dehydrierwärme

		Szenario 1 (best case)	Szenario 2 (-)	Szenario 3 (worst case)
		Abwärmequelle	Reaktionswärme	Vorwärmen+Reaktionswärme
gravimetrische Speicherdichte	$\text{kWh}_{\text{H}_2}/\text{kg}_{\text{LOHC+}}$	2,1	1,5	1,3
volumetrische Speicherdichte	$\text{kWh}_{\text{H}_2}/\text{L}_{\text{LOHC+}}$	1,9	1,4	1,2
Effizienz	-	100 %	73 %	64 %

4.3.5 Wasserstoffreinheit

Je nach Temperatur- und Druckniveau während der Wasserstofffreisetzung kann es zur Verdampfung und in geringem Ausmaß zur Zersetzung des LOHCs kommen. Zwar können diese Vorgänge durch die Wahl moderater Temperaturen und geeigneter Katalysatoren minimal (im ppm Bereich) gehalten, jedoch nicht gänzlich vermieden werden.

Sind Teile des LOHCs bei hoher Temperatur in die Dampfphase übergegangen so verlassen sie mit dem Wasserstoffstrom den Dehydrierer. Die Abscheidung kann durch eine einfache Kühlung des Dampf-/Gasstroms erfolgen (Dephlegmator), da LOHC durch die hohe Siedetemperatur leicht kondensiert. Der Wasserstoffstrom weist nach diesem Schritt bereits die Reinheit 4.0 (Vol.-% $\leq 99,99\%$) auf. Als Verunreinigung können neben minimalen Anteilen des LOHCs auch Wasser und andere Kohlenwasserstoffe vorhanden sein. Letztere entstehen durch Zersetzungs Vorgänge des LOHCs. Insbesondere die kurzkettigen Zersetzungsprodukte wie Methan, Toluol und Benzyltoluol finden den Weg in die Dampfphase und können somit im Wasserstoffstrom in minimalen Konzentrationen zu finden sein.

Die geforderte Reinheit des Wasserstoffs ist primär abhängig von dessen weiterer Nutzung. Bei der Verbrennung des freigesetzten Wasserstoffstroms erscheint eine Reinheit von $>99,99\%$ absolut ausreichend. Weitere Reinigungsschritte nach der oben beschriebenen Kondensation des LOHCs sind somit nicht (zwingend) notwendig. Die Reinheitsanforderungen an eine PEM-Brennstoffzelle sind hingegen deutlich strenger. Dies liegt primär daran, dass spezielle Verunreinigungen die Lebensdauer der Brennstoffzelle deutlich reduzieren. Das Problem an vielen Normen und Vorschriften ist, dass die schädigenden Moleküle nicht spezifiziert werden, sondern häufig lediglich Grenzwerte für ganze Stoffklassen vorgegeben werden. So ist beispielsweise in der Norm ISO 14687-2 beschrieben, dass der Anteil an Kohlenwasserstoffen im Wasserstoffstrom geringer als 2 ppm sein muss. Darüber hinaus beziehen sich die Grenzwerte häufig auf Substanzen, die typischerweise bei der Bereitstellung von Wasserstoff aus fossilen Quellen auftreten.

Wird nun bei der Dehydrierung ein Teil des LOHCs verdampft und nur unzureichend kondensiert, so kann der Volumenanteil von Kohlenwasserstoffen (H0-DBT, H18-DBT) im Wasserstoffstrom über 2 ppm betragen. Laut ISO 14687-2 wäre dieser Wasserstoff nicht für die Nutzung in einer Brennstoffzelle geeignet. Versuche haben gezeigt, dass die Spuren an voll-, un- und teilhydriertem DBT die Membran der Brennstoffzelle nicht schädigen. Versuche zur Reduktion der Diffusion von Wasserstoff durch die Membran bei Belegung mit LOHC wurden nicht durchgeführt. Es ist demnach exakt zu prüfen, welche Reinheitsanforderungen an den freigesetzten Wasserstoff wirklich gestellt werden. Grundsätzlich ist mit einer einfachen Kühlung eine Reinheit 4.0 direkt erzielbar. Je höher die Reinheitsanforderungen sind, desto aufwendiger sind der Trennapparat und in der Regel auch der Energiebedarf.

4.3.6 Transport, Lagerung und Handling

Sowohl H0-DBT als auch H18-DBT sind nicht als Gefahrgut klassifiziert. Über den straßengebundenen Transport (*Accord européen relatif au transport international des marchandises Dangereuses par Route*, ADR) hinweg gilt dies ebenso für die Binnenschifffahrt (*Accord européen relatif au transport international des marchandises dangereuses par voies de navigation intérieures*, ADN), den schienengebundenen Transport (*Règlement concernant le transport international ferroviaire de marchandises Dangereuses*, RID) sowie den Flugtransport (*International Air Transport Association*, IATA) [79, 80]. Insbesondere für den Transport und das Handling stellt dies einen wichtigen Vorteil dar. Kostenintensive Wartungen der Tanks sowie das geschulte Personal für den Transport und für die Förderung entfallen. Darüber hinaus sind die Vorschriften für die Wahl der Transportstrecken sowie den Ort der Lagerung weniger streng (oder existieren nicht). Der Umgang mit (insbesondere) großen Mengen Wasserstoff ($57,2 \text{ g}_{\text{H}_2}/\text{L}_{\text{LOHC}+}$) kann durch die chemische Bindung in H18-DBT somit stark vereinfacht werden.

Dabei ist die Lagerung von H0-DBT und H18-DBT grundsätzlich in allen gängigen Tankausführungen und –geometrien realisierbar. Die Tanks sind drucklos und ohne weitere sicherheitsrelevante Apparate ausführbar. Aufgrund der dieselähnlichen Stoffklasse kann die Lagerung in konventionellen Kraftstoff-Stahltanks bedenkenlos durchgeführt werden. Die Verträglichkeit mit Kunststoff wurde an der Universität Erlangen vor einigen Jahren geprüft. Dabei wurde ein Tankmaterial aus glasfaserverstärktem Kunststoff (Harz P69) verwendet. Bei der Einlagerung von Dibenzyltoluol für 30 Tage bei 40 °C wurde eine Abnahme der mittleren maximalen Zugfestigkeit zwischen 15 und 35 % beobachtet. Es sei jedoch angemerkt, dass der Kunststoff hierbei nicht – wie bei konventionellen Kunststofftanks üblich – an der Kontaktfläche beschichtet wurde. Die organischen Komponenten konnten somit quer in die Faserstruktur des Kunststoffs eindringen und diese nachhaltig schädigen. Ob dies auch bei einer aufgetragenen Beschichtung stattfindet, ist in weiteren Untersuchungen zu prüfen. Im Rahmen der durchgeführten Studie wurden von der Firma Haase GmbH weitere Tests mit Vinylester-Urethan Harzen, wie bspw. FW2045, empfohlen.

Aufgrund der flüssigen Phase bis zu Temperaturen von $< -32 \text{ °C}$ kann grundsätzlich die Pumpförderung eingesetzt werden. Wie jedoch aus den Stoffdatenblättern ersichtlich ist, weist insbesondere H18-DBT bei Umgebungstemperatur eine verhältnismäßig hohe kinematische Viskosität von circa 434 mPas (20 °C) auf (H0-DBT circa 48 mPas bei 20 °C). Im Vergleich dazu liegt der Wert von Diesel bei 2 bis 4,5 mPas (40 °C) [81]. Diese Eigenschaft bedingt eine spezielle Pumpenbauweise (bspw. Zahnradpumpen), die nach Auskunft des Tankstellenherstellers Gilbarco in Tankstellen bereits

heute genutzt werden. Allein die gravimetrische Entleerung von Versorgungsfahrzeugen wird zu lange dauern, so dass die Tankwagen mit Pumpen nachgerüstet werden müssen (vgl. Kapitel 7.2).

4.4 LOHC oder Druckwasserstoff: ein vorgezogenes Fazit

Es stellt sich die Frage, welche konkreten Vor- und Nachteile das LOHC-Konzept gegenüber Druckwasserstoff hinsichtlich der Produkteffizienz vorzuweisen hat. Im Kontext der Versorgung von Schwerlast-LKWs mit Wasserstoff müssen insbesondere die volumetrische Speicherdichte, die Effizienz des Speicherprozesses, das Handling, die Benutzerfreundlichkeit sowie die Integrierbarkeit in bestehende Infrastrukturen berücksichtigt werden.

» Wasserstoffspeicherdichte

Bei einer reinen stofflichen Betrachtung der Wasserstoffspeicherdichte ergibt sich für das LOHC-Konzept ein Wert von $57,2 \text{ g}_{\text{H}_2}/\text{L}_{\text{LOHC+}}$. Elementarer Wasserstoff müsste auf einen Druck von circa 1280 bar komprimiert werden, um eine äquivalenten Wert zu erzielen (ohne die Wanddicke der Umschließung zu rechnen). Wie in der nachstehenden **Abbildung 12** zu entnehmen ist, liegt dies unter anderem an dem zunehmend nicht-idealen Verhalten von Wasserstoff bei hohen Drücken. Der LOHC ermöglicht somit eine drucklose Speicherung mit hohen Wasserstoffspeicherdichten, die mit anderen Konzepten lediglich durch einen großen (technischen) Aufwand realisierbar sind. Es sei jedoch angemerkt, dass die reale Wasserstoffspeicherdichte zusätzlich von der Tankkonstruktion sowie der notwendigen Peripherie abhängt. Im Falle von Druckwasserstoff ist hierbei die Wandstärke eines $> 1.000 \text{ bar}$ Wasserstofftanks und bei dem LOHC die Freisetzungseinheit zu berücksichtigen. Letzten Endes wird das Volumen des Dehydrierers entscheidend für die tatsächlich erzielbaren Vorzüge des LOHC-Konzeptes sein.

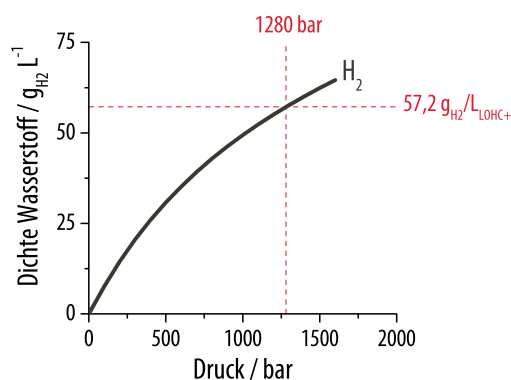


Abbildung 12: Gegenüberstellung der Wasserstoffdichte von Druckwasserstoff und LOHC [45]

» Thermische Energiespeicherdichte

Im Falle von Druckwasserstoff korreliert die Energiespeicherdichte direkt mit der Wasserstoffspeicherdichte über den Heizwert. Im Falle von LOHC muss hingegen der thermische Energiebedarf der Dehydrierung in die Bilanz einbezogen werden (ohne die Gewinnung der Wärme am Ort der Hydrierung zu berücksichtigen). Der Anteil des effektiv nutzbaren Wasserstoffes wird dabei unter Umständen reduziert und eine geringere Energiespeicherdichte erzielt (s. Kapitel 4.3.4). In **Abbildung 13** werden beide Konzepte gegenübergestellt. Für das LOHC-System kann hierbei der Grad der (internen) Wärmebereitstellung zwischen 0 und 100 %

(bezogen auf die maximal notwendige Dehydrierwärme) variiert werden. Es ist dabei zu erkennen, dass der LOHC nur bei geringen mittleren Wärmebereitstellungsgraden in dieser Disziplin Vorzüge aufweist. Muss die gesamte Dehydrierwärme zugeführt werden (100 %), sinkt die Speicherdichte unter die von Druckwasserstoff bei 700 bar. Allerdings muss an dieser Stelle auf den Energiebedarf für die Kompression des Wasserstoffs von 1 auf 700 bar hingewiesen werden ($2,7 \text{ kWh}_{\text{el}}/\text{kg}_{\text{H}_2}$ [46]). Wird dieser in die Bilanz einbezogen, so weist das LOHC-System durchgehen bessere Speicherdichten auf.

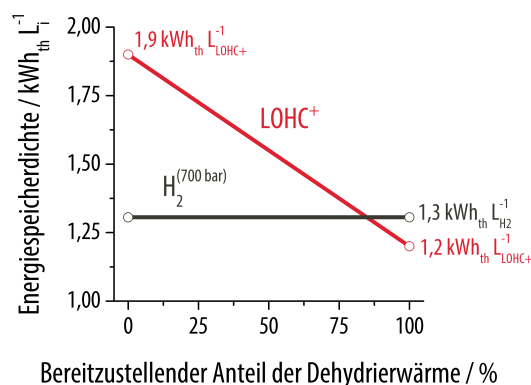


Abbildung 13: Abhängigkeit der volumetrischen Energiespeicherdichte von dem bereitzustellenden Anteil der Dehydrierwärme (0 %: Hydrierwärme steht „frei“ zur Verfügung, 100 %: Vorwärmung und Reaktionswärme wird durch die Verbrennung von Teilen des freigesetzten Wasserstoffs bereitgestellt), die Kompression des Wasserstoffs bleibt unberücksichtigt

» **Effizienz der Wasserstoffspeicherung**

Analog zur thermischen Energiespeicherdichte ist auch die Effizienz der Wasserstoffspeicherung direkt vom Anteil des für die Bereitstellung der Dehydrierwärme verbrannten Wasserstoffs abhängig (maximal $12 \text{ kWh}_{\text{th}}/\text{kg}_{\text{H}_2}$). Darüber hinaus kann die Abgabe der Hydrierwärme an externe Wärmeabnehmer in den Wirkungsgrad einbezogen werden. Pauschal lässt sich für das LOHC-System ein Wirkungsgrad $> 64 \%$ nennen (Wasserstoff-zu-Wasserstoff). Dabei ist es wichtig zu betonen, dass die auftretenden Verluste fast ausschließlich thermischer Art sind und durch eine Wärmeintegration eine deutliche Effizienzsteigerung erzielt werden kann. Dies stellt den wesentlichen Unterschied zur Druckwasserstoffspeicherung dar. In diesem Fall sind die Verluste dem elektrischen Energiebedarf der Kompressor-Einheit geschuldet ($2,7 \text{ kWh}_{\text{el}}/\text{kg}_{\text{H}_2}$ [46]) und dem Druckausgleich bei der Entladung geschuldet.

» **Handling und Benutzerfreundlichkeit**

Die drucklose Speicherung und Lagerung des LOHCs hat entscheidende Vorteile gegenüber der Speicherung von Wasserstoff bei Drücken von 700 bar. Darüber hinaus liegt der Wasserstoff nicht in elementarer Form vor. Damit fallen die zu treffenden sicherheitsrelevanten Maßnahmen bedeutend geringer aus. Dass der LOHC sowohl in be- als auch entladenen Zustand nicht als Gefahrgut klassifiziert ist, erlaubt das zudem ein einfaches Handling. Die Förderung der Flüssigkeiten kann mit kostengünstigen Pumpen erfolgen. Im Gegensatz dazu sind im Falle von Druckwasserstoff kostenintensive Kompressoren, Schläuche und Dichtungen einzusetzen. Ob das Handling von elementarem Wasserstoff bei hohen Drücken auch ungeschultem Personal

erlaubt werden soll, ist unklar. Für LOHC wird es leicht möglich sein, eine geeichte Tankeinheit zu entwickeln. Diese existiert für Druckwasserstoff bis heute nicht.

» **Integrierbarkeit**

Die Integration der LOHC-Technologie in bestehende Infrastrukturen ist grundsätzlich möglich. Sowohl konventionelle Stahltanks als auch die in der Kraftstoffinfrastruktur häufig eingesetzten Mehrkammertanks können genutzt werden. Insbesondere letztere haben den Vorteil, dass je eine Kammer für LOHC⁺ und LOHC⁻ genutzt werden können. Die Lagerung in (leichten) Kunststofftanks muss in weiteren Untersuchungen geprüft werden. Im Falle von Druckwasserstoff sind konstruktiv aufwendige Lagertanks neu zu installieren. Neben der Auslegung für hohe Drücke müssen auch das Wandmaterial sowie jegliche Dichtungen und Ventile für den Kontakt mit elementarem Wasserstoff konzipiert sein. Dies erklärt auch die heutigen Kosten für eine Wasserstofftankstelle von circa 1,5 Mio. €. Insbesondere aus kostentechnischen Gründen stellt dies einen wesentlichen Nachteil für die Nutzung von Druckwasserstoff dar.

» **Komplexität**

Hinsichtlich der Komplexität des reinen Speichervorganges hat der Druckwasserstoff Vorteile. Abgesehen von der Verdichtung und den notwendigen Tankausführungen wird der Wasserstoff in der Form gelagert, in der er schließlich auch wieder zur Verfügung gestellt werden kann. Dementsprechend gibt der Druckwasserstoffspeicher zum einen die gleiche Reinheit als auch nahezu den gleichen Druck wie bei der Einspeicherung ab. Im Falle der LOHC-Technologie ist hier ein nicht zu vernachlässigender Aufwand für die Freisetzung des Wasserstoffs und dessen Aufreinigung zu betreiben. Die Be- und Entladeeinheit ist ein teils komplexer verfahrenstechnischer Schritt.

Es lässt sich zusammenfassen, dass die Speicherung von Wasserstoff in LOHCs insbesondere unter den Kriterien der Sicherheit, Handhabbarkeit sowie der Integrierbarkeit in existierende Infrastrukturen deutliche Vorteile aufweist. Bezogen auf die Komplexität der Speichertechnologie muss der Speicherung von elementarem Wasserstoff bei 700 bar der Vorzug gewährt werden. Das LOHC-System hat das Potenzial, eine höhere volumetrische Wasserstoffspeicherdichte zu erzielen. Entscheidend hierbei ist jedoch, ob die Dehydrierwärme aus externen Quellen bereitgestellt werden kann bzw. welcher Anteil des freigesetzten Wasserstoffs zur Beheizung der Dehydrierung verbrannt werden muss. Darüber hinaus wird das Volumen der Freisetzungseinheit einen – wenn nicht sogar den – entscheidenden Einfluss auf die tatsächlich erzielbare Wasserstoff- und Energiespeicherdichte haben.

5 Wie sieht ein LOHC-basierter

Antriebsstrang aus?

Grundlegend soll das Ziel verfolgt werden, regenerativen Strom mittels Elektrolyse in Wasserstoff zu konvertieren. Dieser wird in einer stationären Hydriereinheit an den LOHC gebunden. Der LKW wird anschließend mit dem nun vorliegenden LOHC⁺ betankt. Im Fahrzeug soll dann bedarfsorientiert die Freisetzung des Wasserstoffs in einer Dehydriereinheit stattfinden (on-board Freisetzung) und dieser schließlich in mechanische Energie umgesetzt werden. Das entladene LOHC⁻ wird anschließend in eine andere Tankkammer des LKWs gefördert und an der Tankstelle gegen LOHC⁺ ausgetauscht. Der Tank des Fahrzeugs ist somit immer mit LOHC gefüllt, lediglich der Energieinhalt (Wasserstoffgehalt) nimmt durch den Betrieb des LKWs ab.

5.1 Grundkonzept der on-board H₂-Freisetzung

Der Einsatz der LOHC-Technologie als Wasserstoffspeicher für Schwerlast-LKWs bedingt gewisse Neuentwicklungen und Anforderungen an die Konzeption des Antriebsstrangs. Dabei können unterschiedliche Szenarien für die Bereitstellung der notwendigen Freisetzungswärme, mehrere Varianten zur Umsetzung des freigesetzten Wasserstoffs in die geforderte Antriebsenergie und Konzepte zur Abbildung der geforderten Dynamik ausgearbeitet werden. Eine allgemeine Übersicht des LOHC-basierten Ansatzes ist in **Abbildung 14** dargestellt.

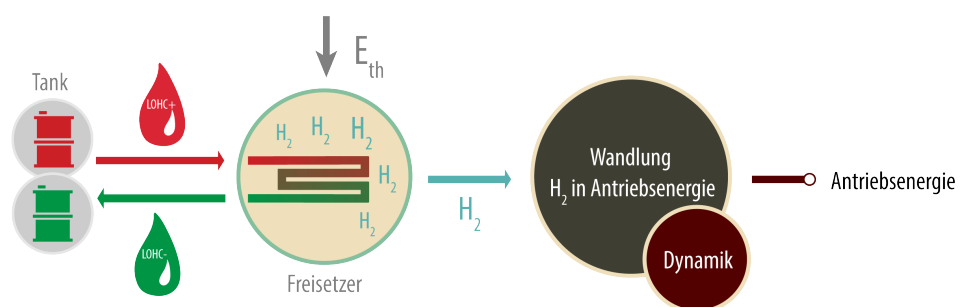


Abbildung 14: Grundschemata eines LOHC-basierten Antriebsstrangs mit on-board Wasserstofffreisetzung

5.1.1 Kurzbeschreibung der grundlegenden Komponenten

» Tank

Besonderheit des LOHC-Konzeptes und der on-board Freisetzung ist, dass der Energieträger nicht verbraucht, sondern nur entladen wird. Der Füllstand des Tanks sinkt somit beim Betrieb des LKWs nicht. Die H₂-Freisetzungseinheit bezieht aus dem Tank das wasserstoff-reiche LOHC⁺ und setzt den gespeicherten Wasserstoff frei. Das wasserstoff-arme LOHC⁻ wird anschließend in den Tank zurückgepumpt. Dabei ist eine Vermischung von LOHC⁺ und LOHC⁻ aus finanziellen Gründen nicht zweckmäßig. Demzufolge gibt es theoretisch zwei Varianten:

- a. Die Installation von mehreren separaten Behälter oder eines Mehrkammertanks. Im Falle von zwei Kraftstoffkammern müssen beide so dimensioniert sein, dass jede die gesamte Menge an LOHC⁺ bzw. LOHC⁻ aufnehmen können. Diese Lösung erscheint jedoch aus Platzgründen auf einem LKW nicht zweckmäßig. Eine Alternative wäre die Installation eines Kaskadentank-Systems (Mehrkammertank). Bei der Nutzung von beispielsweise fünf Kammern, werden bei der Betankung lediglich vier Behälter mit LOHC⁺ gefüllt. Der aus Kammer 1 bezogene LOHC⁺ wird dehydriert und anschließend in die initial leere Kammer 5 gefördert. Ist Behälter 1 nun ausgeschöpft, wird aus Kammer 2 der LOHC⁺ entladen und das gebildete LOHC⁻ in dem nun leeren Behälter 1 gelagert. Der Prozess wird so lange fortgeführt, bis vier Kammern mit LOHC⁻ gefüllt sind und der gesamte Wasserstoff freigesetzt wurde. Mit diesem System wird das „Leervolumen“ auf ein Fünftel des gesamten Tankvolumens reduziert. Eine Erhöhung der Kammeranzahl sorgt für eine weitere Minimierung dieses ungenutzten Volumens, bedingt jedoch ein aufwendigeres Tankmanagement.
- b. Die Nutzung eines Diaphragma- oder Blasentanks (bladder). Kernziel beider Verfahren ist die getrennte Lagerung von LOHC⁺ und LOHC⁻ in einem Tank. Die Vermischung wird dabei entweder durch eine variable Membran oder durch eine flexible Blase realisiert. Aufgrund der sehr ähnlichen Dichten von LOHC⁻ und LOHC⁺ kann somit das installierte Tankvolumen stets (optimal) ausgenutzt werden.

» H₂-Freisetzungseinheit

Kernaufgabe der H₂-Freisetzungseinheit ist die möglichst effiziente Freisetzung des Wasserstoffs aus dem LOHC⁺. Dabei können unter diesem Begriff der Dehydrierreaktor und dessen Begleitheizung, Komponenten für die Wärmerecuperation sowie eventuell notwendige Apparaturen für die Wasserstoffreinigung zusammengefasst werden. Essentieller Punkt im Hinblick auf einen LOHC-basierten Antriebsstrang ist die Bereitstellung des Wärmebedarfs der Freisetzungseinheit. In einem ersten Schritt ist dabei das Ziel zu verfolgen, die zuzuführende Wärmemenge durch die Nutzung verfügbarer Abwärmequellen zu reduzieren. Der verbleibende Anteil kann anschließend durch eine interne Lösung (Teilverbrennung des freigesetzten Wasserstoffs) oder eine externe Wärmezufuhr gedeckt werden (vgl. Kapitel 4.3.4). Unter einer externen Wärmezufuhr kann eine Art *Dual-Fuel Lösung* verstanden werden. Dabei wird ein zweiter (spezieller und möglichst regenerativer) Energieträger mit an Bord geführt, dessen einzige Aufgabe die Bereitstellung der Dehydrierwärme ist.

» Einheit zur Wandlung von Wasserstoff in Antriebsenergie

Die fahrzeugeitige Wandlung von Wasserstoff in mechanische Energie kann über zwei grundlegend unterschiedliche Ansätze erfolgen: 1.) Nutzung in einer Verbrennungskraftmaschine (Motor). 2.) Konversion in einer Brennstoffzelle zu Strom und Antrieb mittels Elektromotor.

In einem Wasserstoffverbrennungsmotor (kurz: H₂-Motor) wird Wasserstoff mit Luft zu Wasserdampf oxidiert. Die Abgase sind dementsprechend frei von Kohlenwasserstoffen¹¹. Durch die (potenziell) hohen Verbrennungstemperaturen kann es jedoch durch Reaktion des Luftstickstoffs zur Bildung von Stickoxiden kommen. Trotz angestrebtem Magerbetrieb ist eine Abgasnachbehandlung dieser Variante zwingend erforderlich. Die Wandlung von Wasserstoff in Strom mittels einer Brennstoffzelle ist dagegen von Natur aus emissionsfrei. Auch hier wird der Wasserstoff oxidiert und als Wasserdampf an die Atmosphäre abgeführt. Der bereitgestellte Strom speist schließlich einen Elektromotor, der für den Antrieb des Fahrzeugs genutzt wird. Hinsichtlich der Brennstoffzelle muss zwischen Polymerelektrolytbrennstoffzellen (Proton Exchange Membrane Fuel Cell, kurz: PEMFC) und Festoxidbrennstoffzelle (engl. Solid Oxide Fuel Cell, kurz: SOFC) differenziert werden. Augenscheinlichster Unterschied dieser beiden Brennstoffzellentypen ist die Betriebstemperatur. Während PEMFC bei Temperaturen < 100 °C arbeiten, liegt die Temperatur einer SOFC in der Regel (teils) deutlich über 500 °C [82]. Dieser Aspekt kann im Kontext des hier betrachteten Konzeptes von Bedeutung sein: Komponenten mit einer hohen Betriebstemperatur (H₂-Motor, SOFC) könnten zur Deckung des Wärmebedarfs der Freisetzungseinheit genutzt werden.

» Einheit zur Abbildung der Dynamik

Wesentliche Herausforderung bei der Konzeptionierung eines neuartigen Antriebsstrangs ist Abbildung der gewünschten Fahrdynamik. Dabei kann das System zum einen so konzipiert werden, dass es durch schnelle Reaktionszeiten direkt auf die neuen Anforderungen reagieren kann. Ist dies aufgrund der Trägheit einzelner Komponenten nicht möglich, so muss eine Art Leistungspuffer in den Antriebsstrang integriert werden. Die Aufgabe dieser Komponente ist die kurzzeitige Deckung auftretender Lastspitzen.

In Verbindung mit dem LOHC-Konzept ist davon auszugehen, dass die Einbindung eines Leistungspuffers notwendig ist. Die H₂-Freisetzungseinheit kann zwar kleinere Lastspitzen alleine durch ihren Gasraum abbilden, der vollständigen Dynamik jedoch sicher nicht folgen. Als Lösung wäre die Integration eines H₂-Pufferspeichers oder einer Batterie möglich.

¹¹ Durch die Verdampfung von Schmiermitteln und Motorölen kann es zu Spuren von Kohlenwasserstoffen im Abgas kommen.

5.1.2 Anforderungen an den Antriebsstrang

Zur Skizzierung potenzieller LOHC-basierter Antriebsstränge sind zunächst einige Anforderungen und Rahmenbedingungen zu definieren. Darüber hinaus muss eine Reihe von Annahmen getroffen werden, um eine (überschlägige) Bilanzierung und Dimensionierung der Konzepte durchzuführen.

Die speziellen Anforderungen an den Antriebsstrang eines Schwerlast-LKWs sind sehr vielschichtig. Sie können in vier unterschiedliche Kategorien eingeteilt werden:

- 1.) Produkteffizienz
- 2.) Kenndaten der Antriebseinheit
- 3.) Betriebssicherheit
- 4.) Zulassungsbedingungen

Der Begriff der Produkteffizienz wurde in Kapitel 3 eingeführt. Spezifische Kennzahlen wie der initiale Energiebedarf zur Bereitstellung einer bestimmten Antriebsenergie kann über die Effizienz der einzelnen Prozessschritte einbezogen werden. Die Ökobilanz wird hier primär unter dem Gesichtspunkt der Schadstoffemissionen berücksichtigt.

Für eine erste Dimensionierung werden die Kenndaten der Antriebseinheit an die Eigenschaften eines konventionellen, dieselbetriebenen Schwerlast-LKWs angelehnt. Zur Abbildung der Dynamik wird in einem Szenario angenommen, dass die erforderliche Spitzenlast von $360 \text{ kW}_{\text{mech}}$ zur Hälfte aus einem Leistungspuffer bereitgestellt wird. Folgende Anforderungen müssen von der Antriebseinheit gedeckt werden:

- » Spitzenlast: $360 \text{ kW}_{\text{mech}}$
- » Durchschnittsleistung: $120 \text{ kW}_{\text{mech}}$
- » Mittlere Antriebsenergiemenge¹²: $130 \text{ kWh}_{\text{mech}}/100 \text{ km}$
- » Leistungspuffer: $180 \text{ kW}_{\text{mech}}$ (50 % der Spitzenlast) mit einer Kapazität von $90 \text{ kWh}_{\text{mech}}$
- » Maximales Tankvolumen: 1.500 L
- » Minimale Reichweite: 800 km

Im Kontext der Betriebssicherheit sind eine Reihe von Anforderungen an die Konzeptionierung der Antriebseinheiten zu nennen:

- » Kaltstartfähigkeit
- » Betrieb bei hohen und tiefen Umgebungstemperaturen
- » Vibrationen
- » Wartungsanfälligkeit
- » Lebensdauer
- » „Reparierbarkeit“ im Sinne der technologischen Neuerung

¹² Bei einem Verbrauch von $34,1 \text{ L}_{\text{Diesel}}/100 \text{ km}$ und einem Wirkungsgrad des Dieselmotors zwischen 35 und 41 % ergeben sich zwischen 120 und $140 \text{ kWh}_{\text{mech}}/100 \text{ km}$ Antriebsenergiemenge. Für die hier durchgeführten Untersuchungen wird demnach ein Wert von $130 \text{ kWh}_{\text{mech}}/100 \text{ km}$ angenommen.

Zwar spielen die Zulassungsbedingungen eine wichtige Rolle bei der Konzeptionierung der Einheiten, dennoch soll der Fokus der folgenden Untersuchungen auf den technischen Aspekten liegen. Demnach bleibt dieser Gesichtspunkt zunächst unberücksichtigt.

Auch für das LOHC-System sind einige Annahmen zu treffen. Hinsichtlich des Wärmebedarfs der Freisetzungseinheit werden die Werte aus Kapitel 4.3.4 herangezogen. Darüber hinaus wird angenommen, dass der maximale Druck des freigesetzten Wasserstoffs bei 4 bar liegt. Dies ist insbesondere für die Nutzung des Wasserstoffstromes von Bedeutung.

- » Temperatur des Freisetzers: 320 °C
- » Druck des Freisetzers: max. 4 bar
- » Dehydrierhub: 90 %
(Hydriergrad LOHC⁺: 100 % -> Hydriergrad LOHC: 10%, maximale H₂-Beladung: 5,6 Massenprozent)
- » Energiebedarf der Freisetzungseinheit: 12 kWh_{th}/kg_{H₂}
(Reaktionswärme: 9 kWh_{th}/kg_{H₂}, Vorwärmen von 25 auf 300 °C: 3 kWh_{th}/kg_{H₂})
- » Betrachtete Szenarien zur Bereitstellung des Energiebedarfs der Freisetzungseinheit (vgl. Kapitel 4.3.4)
 - best case: Wärmebedarf vollständig durch interne Wärmerückgewinnung gedeckt
 - worst case: Verbrennung eines Teils des freigesetzten Wasserstoffs in einem H₂-Brenner
 - worst case: Dual-Fuel Szenario mit Biodiesel als Sekundärkraftstoff

5.2 Szenarien der on-board H₂-Freisetzung

5.2.1 LOHC und H₂-Verbrennungsmotor

Der in der Freisetzungseinheit zur Verfügung gestellte Wasserstoff kann mit Hilfe eines Wasserstoffverbrennungsmotors in Antriebsenergie umgewandelt werden. Die Verbrennung von Wasserstoff in einem Verbrennungsmotor ist geprägt von dem hohen Heizwert, der hohen Verbrennungstemperatur, den weiten Zündgrenzen, dem hohen Diffusionskoeffizienten sowie der geringen Zündenergie. Diese Eigenschaften stellen sogleich Chancen als auch Herausforderungen dar [38, 47]. Durch die weiten Zündgrenzen kann der Motor (äußerst) mager betrieben und damit die hohen Verbrennungstemperaturen gesenkt werden. In Kombination mit dem LOHC-Konzept kann der in **Abbildung 15** skizzierte Antriebsstrang angedacht werden.

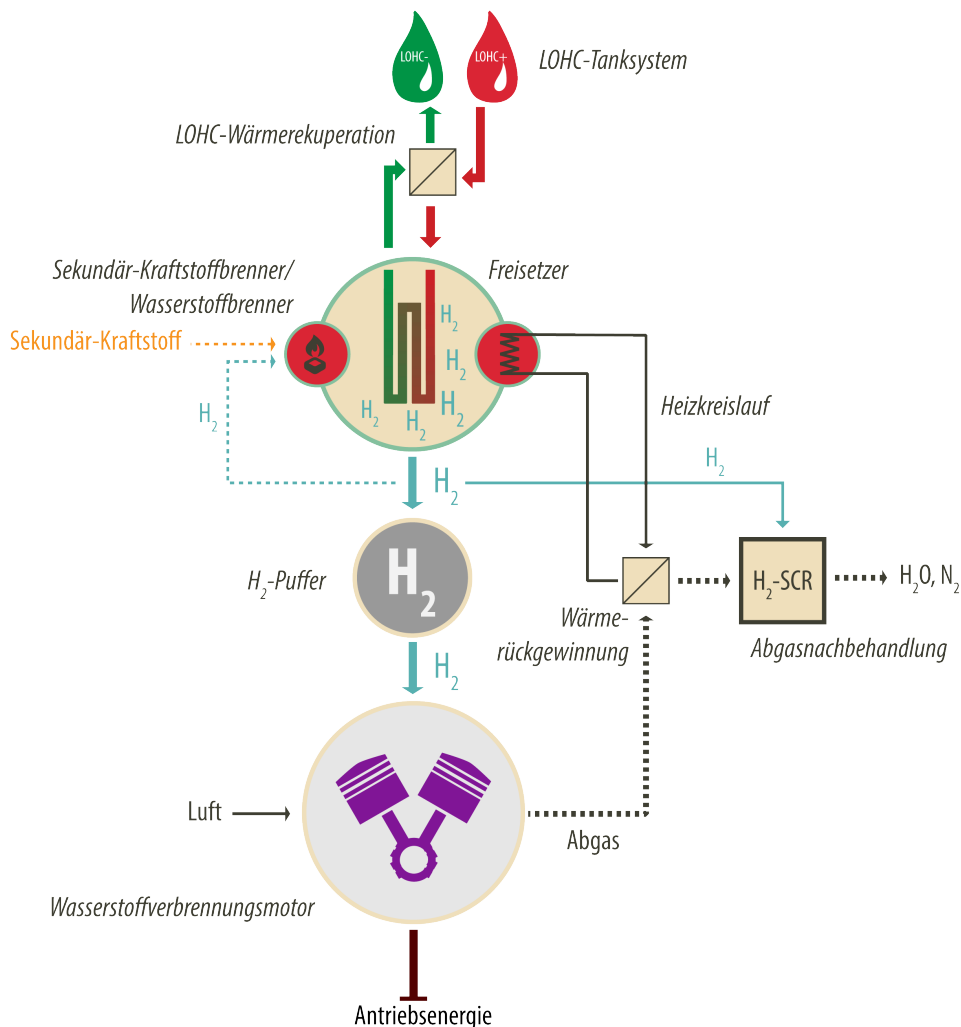


Abbildung 15: LOHC-basierter Antriebsstrang mit on-board Wasserstofffreisetzung und Wasserstoffverbrennungsmotor

Grundidee

Dabei wird das LOHC⁺ aus dem Tank in den Freisetzer gefördert. Dort wird der Wasserstoff freigesetzt und LOHC⁺ dehydriert. Das LOHC wird über einen Wärmeübertrager – zur Vorwärmung von LOHC⁺ - zurück in den Tank gefördert. Der verfügbare Wasserstoff wird über einen Wasserstoffpuffer dem Motor zugeführt. Im Motor selbst wird durch die Verbrennung eines Luft-/Wasserstoffgemisches die gewünschte Antriebsenergie bereitgestellt. Das heiße Abgas wird über einen Wärmeübertrager gekühlt und damit Wärme auf einen Heizkreislauf übertragen. Dieser stellt einen Teil der notwendigen Dehydrierwärme zur Verfügung. Reicht diese rückgewonnene thermische Energie nicht aus, so können zwei Optionen angedacht werden: 1.) Ein Teil des freigesetzten Wasserstoffstroms aus dem Dehydrierer wird einem Wasserstoffbrenner zugeführt. Der auf diesem Wege abgeführte Wasserstoffstrom wird dabei so geregelt, dass der Freisetzer auf der gewünschten Reaktionstemperatur gehalten wird. 2.) Ein mitgeführter zweiter Kraftstoff (bspw. Biodiesel) wird einem Brenner zugeführt und stellt die verbleibende Wärme für die Freisetzungseinheit bereit (Dual-Fuel Konzept). Das gekühlte Motorabgas wird in einem weiteren Schritt einer H₂-SCR (H₂-selective catalytic reduction) Einheit zugeführt. Dabei werden mit Hilfe eines Wasserstoffstromes die während der Verbrennung gebildeten Stickoxide reduziert.

Druckniveau des Injektors

Grundsätzlich arbeitet der Wasserstoffverbrennungsmotor bei hohen Injektionsdrücken. In Studien der Universität Erlangen-Nürnberg konnte gezeigt werden, dass ein Druckniveau von 8 bar gerade noch eine hinnehmbare Betriebsweise des Motors gestattet. Da der Druck der Freisetzungseinheit bei maximal 4 bar liegt, ist eine Kompression des Wasserstoffs unabdingbar. Dies stellt – im Vergleich zur Druckwasserstoffspeicherung – eine Besonderheit der Kombination aus LOHC und Wasserstoffverbrennungsmotor dar. Als untere Grenze der Kompression kann ein Wert von 10 bar angenommen werden.

H₂-Pufferspeicher

Zur Abbildung der Dynamik ist ein Wasserstoffpuffer vorgesehen. Dieser soll laut Vorgabe (s. Kapitel 5.1.2) die Hälfte der Spitzenlast (360 kW_{mech}) abdecken und 90 kWh_{mech} Antriebsenergie bereitstellen können. Mit dem Wirkungsgrad des Wasserstoffverbrennungsmotors (42 % [38]) und dem Heizwert von Wasserstoff (33,3 kWh_{th}/kg_{H₂}) ergibt sich eine Wasserstoffmenge von 6,5 kg_{H₂} (für 90 kWh_{mech}) und eine Wasserstoffleistung von 429 kW_{H₂} (für 180 kW_{mech}) – entsprechend einem Wasserstoffstrom von 12,9 kg_{H₂}/h. Würde der Puffer bei dem Druck der Freisetzungseinheit betrieben werden, so wäre ein Volumen von 13.500 L_{H₂} notwendig (P_{max} = 4 bar). Dies zeigt, dass eine H₂-Druckspeicherung unabdingbar ist. Damit wäre allerdings auch das bereits geschilderte Problem der geforderten hohen Injektionsdrücke des Wasserstoffmotors gelöst und der Freisetzer könnte bei geringen Drücken arbeiten (thermodynamisch vorteilhaft, die Freisetzungstemperatur kann abgesenkt werden). Selbst bei den dabei angestrebten minimalen Drücken von 10 bar wäre das Speichervolumen eines 6,5 kg_{H₂} Wasserstoffpuffers noch deutlich zu groß. Letzten Endes muss der Energiebedarf für die Kompression gegen das H₂-Puffervolumen abgewogen werden. **Abbildung 16** zeigt das H₂-Volumen in Abhängigkeit des geforderten Druckniveaus. Mit Drücken bis 100 bar könnte das H₂-Pufferspeichervolumen auf 860 L_{H₂} reduziert werden. Dabei muss allerdings zusätzlich die Wandstärke sowie insbesondere das Gewicht des Druckspeichers in eine finale Bewertung einbezogen werden.

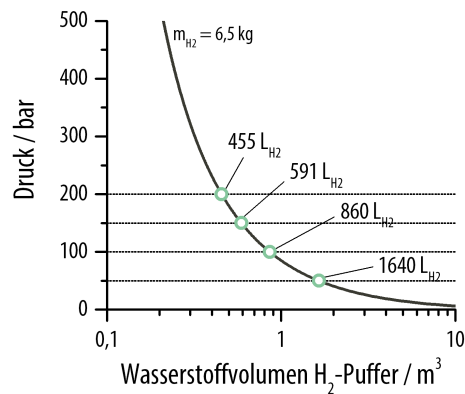


Abbildung 16: Stoffliches Volumen eines Wasserstoffpuffers in Abhängigkeit des Drucks

Emissionen (DeNO_x)

Obwohl es sich bei einem Wasserstoffverbrennungsmotor um eine klassische Verbrennungskraftmaschine handelt, ist die Emission von Kohlenwasserstoffen ausgeschlossen. Bei dem Einsatz von Wasserstoff kann es jedoch zur Bildung von Stickoxiden während der Verbrennung kommen. Um diese zu reduzieren steht neben den konventionellen Pfaden (AdBlue) auch die Option einer H₂-SCR zur Verfügung. Dieser Pfad ist bei der Nutzung von Wasserstoff als Kraftstoff naheliegend. Dabei werden die Stickoxide mit Hilfe von Wasserstoff in einer katalytischen Reaktion zu N₂ und H₂O umgesetzt, ohne große Reaktion mit dem Laftsauerstoff. Vorteilhaft dieses Ansatzes ist, dass diese Art der NO_x-Reduktion auch bei Temperaturen < 150 °C effektiv zu betreiben ist. Insbesondere für mager betriebene Diesel- oder Wasserstoffmotoren, deren Abgastemperatur diese Temperaturschwelle nicht wesentlich überschreitet, stellt die H₂-SCR einen interessanten Ansatz dar. Im Gegensatz zu AdBlue (hohe Reaktionstemperatur) ist die Platzierung der DeNO_x-Einheit weitgehend frei. Ziel muss es sein, das hier diskutierte LOHC-basierte verbrennungsmotorische Antriebskonzept mit Hilfe einer DeNO_x-Einheit so zu betreiben, dass die Emissionen unter der Analysengrenze liegen (zero emission). Als grober Richtwert kann von einem LOHC-Bedarf von 0,7-4 L_{LOHC}/100 km (siehe Kapitel 7.1) ausgegangen werden. Wird das Fahrzeug mit LOHC betrieben, ist das unbedeutend. Im Gegensatz zu AdBlue braucht LOHC weder in der Tankstelle noch im Fahrzeug begleitbeheizt aufbewahrt werden.

Kaltstartfähigkeit

Bei einem Kaltstart ist es essentiell, die Freisetzungseinheit zunächst auf Temperatur zu bringen um dann den gebundenen Wasserstoff für den Antrieb freizusetzen. Bei Standzeiten < 10 Stunden ist aufgrund der Dimension und thermischen Masse der Einheit und in Verbindung mit einer angemessenen Isolierung von keiner wesentlichen Abkühlung auszugehen. Ist das System vollständig auf Umgebungstemperatur, so könnte der H₂-Pufferspeicher in Kombination mit einem H₂-Brenner genutzt werden. In diesem Fall ist es wichtig, dass der H₂-Puffer vor dem Herunterfahren des Systems (vollständig) gefüllt wird. Damit würden für den Kaltstart 6,5 kg_{H₂} und somit eine Heizenergie von 215 kWh_{th} zur Verfügung stehen. Diese sollte ausreichen, um das System zu temperieren und die Freisetzungseinheit in den optimalen Betriebspunkt anzufahren. Als Alternative könnte selbstverständlich auch ein Sekundär-Kraftstoff für den Kaltstart eingesetzt werden. Darüber hinaus kann angedacht werden, einen sehr geringen Anteil des LOHCs zu verbrennen und somit den Wärmebedarf zur Aufheizung der Einheit zuzuführen.

Wasserstoffreinheit

Hinsichtlich der erforderlichen Wasserstoffreinheit stellt der Verbrennungsmotor keine besonderen Anforderungen an die Reinigungsstrecke nach der Freisetzungseinheit. Theoretisch wäre die direkte Nutzung des freigesetzten Wasserstoffs denkbar. Durch die Integration einer einfachen Kühlstrecke könnte jedoch das durch den Wasserstoff mitgerissene LOHC kondensiert und in den Kreislauf zurückgeführt werden (siehe Kapitel 4.3.5).

Bilanzierung

» *Wasserstoffbedarf für den Antrieb*

Bei einem Wirkungsgrad des Wasserstoffverbrennungsmotors von 42 % sind 310 kWh_{H₂}/100 km zur Bereitstellung der mittleren Antriebsenergie von 130 kWh_{mech}/100 km gefordert. Unter Berücksichtigung des Heizwertes von H₂ müssen somit im Mittel 9,3 kg_{H₂}/100 km für den Antrieb dem Motor zur Verfügung gestellt werden.

» *Szenarien zur Bereitstellung der Wärme für die Freisetzungseinheit*

Für die Bilanzierung der Freisetzungseinheit kann gemäß den in Kapitel 4.3.4 erläuterten Szenarien zwischen dem best case und worst case differenziert werden. Unter der Annahme, dass die Abwärme des Abgases vollständig für die Versorgung der Freisetzungseinheit ausreicht, entspricht die obige Wasserstoffmenge dem tatsächlichen Bedarf. In dem pessimistischen Szenario (worst case) wird das LOHC⁺ bei Umgebungstemperatur aus dem Tank zum Freisetzer gefördert und sowohl Energie für die Vorwärmung als auch für die Dehydrierung aufgewendet, dann sind weitere 12 kWh_{th}/kg_{H₂} thermische Energie aufzubringen. Wird diese – wie in **Abbildung 15** angedeutet – durch einen Wasserstoffbrenner bereitgestellt, steigt die freizusetzende Wasserstoffmenge auf einen Wert von 14,7 kg_{H₂}/100 km. In einem Dual-Fuel Ansatz könnten diese 12 kWh_{th}/kg_{H₂} durch die Verbrennung eines Sekundär-Brennstoffs bereitgestellt werden. Im Falle von Biodiesel wären demzufolge circa 1,2 L_{Diesel}/kg_{H₂} bzw. 11,1 L_{Diesel}/100 km notwendig. Allerdings zeigten sich die Fahrzeughersteller in einem Workshop skeptisch, ob das Dual-fuel Konzept breit umsetzbar ist.

» *Leistungsbilanz ohne H₂-Pufferspeicher*

Würde der Wasserstoff direkt dem Verbrennungsmotor zugeführt werden (kein Puffer), so muss die Freisetzungseinheit im best case Szenario bei der angenommenen Durchschnittsleistung von 120 kW eine Wasserstoffleistung von 286 kW_{H₂} – entsprechend einem Wasserstoffstrom von 8,6 kg_{H₂}/h zur Verfügung stellen. Im Falle des Abrufs der Spitzenlast (360 kW) liegen die Werte bei 857 kW_{H₂} bzw. 25,7 kg_{H₂}/h. Im worst case Szenario ergeben sich bei der Teilverbrennung des freigesetzten Wasserstoffs Werte von 13,6 (Teillast) bzw. 40,8 kg_{H₂}/h (Vollast) (entsprechend 453 bzw. 1.358 kW_{H₂}). Alternativ kann im worst case Szenario durch das Dual-Fuel Konzept die Freisetzerwärme durch die Verbrennung von Biodiesel erfolgen. Hierbei wäre ein Dieserverbrauch von 10,3 L_{Diesel}/h bzw. 30 L_{Diesel}/h im Teil- bzw. Vollastpunkt notwendig.

» *Leistungsbilanz mit H₂-Pufferspeicher*

Durch den Einsatz eines Wasserstoffpuffers ergeben sich geringe Anforderungen an die Freisetzungseinheit. Sowohl eine kleinere Dimensionierung als auch ein optimierter Betrieb werden damit möglich. Der Puffer soll dabei 180 kW_{mech} sowie 90 kWh_{mech} abdecken. Umgerechnet in Wasserstoff ergibt sich damit eine Kapazität von circa 6,5 kg_{H₂} sowie eine auf den Heizwert bezogene Wasserstoffleistung von circa 430 kW_{H₂} (12,9 kg_{H₂}/h).

Die Freisetzungseinheit muss in best case in diesem Fall noch 430 kW_{H₂} bzw. 12,9 kg_{H₂}/h bereitstellen. Im worst case ergibt sich bei der Teilverbrennung von H₂ eine notwendige Freisetzerleistung von circa 679 kW_{H₂} - entsprechend einer Freisetzungsrate von 20,4 kg_{H₂}/h. Soll anstatt H₂ ein Sekundär-Kraftstoff zur Deckung des Energiebedarfs der Freisetzungseinheit verwendet werden, so sind im Falle von Biodiesel 15,5 L_{Diesel}/h notwendig.

» **Erzielbare Reichweite**

Mit den Werten des mittleren Wasserstoffbedarfs kann nun die Reichweite des LKWs ermittelt werden. Bei spezifischen Wasserstoffmengen von 9,3 kg_{H₂}/100 km ergibt sich ein LOHC⁺ Bedarf von 181 L_{LOHC⁺}/100 km, im Falle von 14,6 kg_{H₂}/100 km ein Wert von 286 L_{LOHC⁺}/100 km. Bei einem maximalen Tankvolumen von 1.500 L¹³ resultiert für das Szenario ohne Wärmerückgewinnung und mit H₂-Verbrennung daraus eine Reichweite von circa 520 km. Wird Biodiesel als Sekundär-Kraftstoff eingesetzt, so kann die Reichweite auf 780 km erweitert werden. Im Falle einer vollständigen Deckung des Freisetzerwärmebedarfs durch die Abgaswärme liegt der Wert bei 830 km. **Tabelle 3** fasst die Ergebnisse der stationären Bilanzierung zusammen.

Tabelle 3: Bilanzierung eines LOHC-basierten Antriebsstrangs mit Wasserstoffverbrennungsmotor - spezifischer Wasserstoff- und LOHC-Bedarf, Freisetzungsrate sowie Reichweite ($\eta_{\text{Motor, H}_2} = 42\%$ [38], Hydrierhub: 90 %)

	best case	worst case	worst case
	<i>Abwärmennutzung</i>	<i>H₂-Verbrennung</i>	<i>Dual-Fuel (Diesel)</i>
spez. Wasserstoffbedarf (für 130 kWh _{mech} /100 km)	9,3 kg _{H₂} /100 km	14,7 kg _{H₂} /100 km	9,3 kg _{H₂} /100 km (+ 11,1 L _{Diesel})
spez. LOHC+ Bedarf (für 130 kWh _{mech} /100 km)	181 L _{LOHC⁺} /100 km	286 L _{LOHC⁺} /100 km	181 L _{LOHC⁺} /100 km (+ 11,1 L _{Diesel})
H₂-Freisetzungsrate (Teillast, 120 kW _{mech})	8,6 kg _{H₂} /h	13,6 kg _{H₂} /h	8,6 kg _{H₂} /h (+ 10,3 L _{Diesel} /h)
	286 kW _{H₂}	453 kW _{H₂}	286 kW _{H₂}
H₂-Freisetzungsrate (Volllast, 360 kW _{mech})	25,7 kg _{H₂} /h	40,8 kg _{H₂} /h	25,7 kg _{H₂} /h (+ 30,0 L _{Diesel} /h)
	857 kW _{H₂}	1.358 kW _{H₂}	857 kW _{H₂}
H₂-Freisetzungsrate (mit 180 kW _{mech} Puffer ^(a))	12,9 kg _{H₂} /h	20,4 kg _{H₂} /h	12,9 kg _{H₂} /h (+ 15,5 L _{Diesel} /h)
	430 kW _{H₂}	679 kW _{H₂}	430 kW _{H₂}
Reichweite (bei 1.500 L)	830 km	520 km	780 km

^(a) Der Puffer deckt 180 kW_{mech} im Volllastpunkt mit einer Kapazität von 90 kWh_{mech} ab. Somit muss er ein Fassungsvermögen von 6,5 kg_{H₂} aufweisen und einen Wasserstoffstrom von 12,9 kg_{H₂}/h bereitstellen.

¹³ Es gibt Hinweise, dass die Grenze nur für Stoffe gilt, die ein Gefahrgut sind. Das trifft für alle Hydriergrade des LOHC nicht zu, insofern kann die Grenze obsolet sein.

5.2.2 LOHC und Brennstoffzelle

Grundidee

Der in der Freisetzungseinheit zur Verfügung gestellte Wasserstoff kann mit Hilfe einer Brennstoffzelle in Strom und dieser mit einem Elektromotor in Antriebsenergie umgewandelt werden. In Kombination mit dem LOHC-Konzept ist in der **Abbildung 17** ein Antriebsstrang skizziert. Das wasserstoff-reiche LOHC⁺ wird aus dem Tank dem Freisetzer zugeführt. Dort wird LOHC⁺ dehydriert und der Wasserstoff freigesetzt. Analog zum Szenario mit Wasserstoffmotor kann das heiße LOHC⁻ auch an dieser Stelle mittels Wärmeübertrager zur Vorwärmung von LOHC⁺ genutzt werden. Der verfügbare Wasserstoff wird der Brennstoffzelle zugeführt und in Strom konvertiert, welcher kontinuierlich eine Batterie (Puffer) speist. Der Druck des freigesetzten Wasserstoffstroms (max. 4 bar) ist ausreichend für den Betrieb der Brennstoffzelle, so dass keine weitere Kompression notwendig ist. Die abzuführende Wärme kann ggf. über einen weiteren Wärmeübertrager und einen Heizkreislauf Wärme für die Freisetzungseinheit bereitstellen. Der dabei nicht-gedeckte Teil der Dehydrierwärme muss über einen Wasserstoffbrenner oder einen Sekundär-Brennstoff zugeführt werden. Die von der Brennstoffzelle gespeiste Batterie versorgt einen Elektromotor der die gewünschte Antriebsenergie zu Verfügung stellt.

Wahl der Brennstoffzelle

Grundsätzlich kann das Konzept mit einer Niedertemperatur PEM und einer Hochtemperatur SOFC Brennstoffzelle ausgeführt werden. Da sich bei einer SOFC starke Temperaturwechsel (Mindesttemperatur > 500 °C) jedoch merkbar auf die Lebensdauer auswirken, wird hier diese Variante hier zunächst nicht berücksichtigt und nur das Szenario mit einer PEM Brennstoffzelle bilanziert.

Überlegungen zur Batterie

Zur Abbildung der Dynamik ist eine Batterie vorzusehen. Diese soll laut Vorgabe (s. Kapitel 5.1.2) die Hälfte der Spitzenlast (360 kW_{mech}) abdecken und 90 kWh_{mech} Antriebsenergie bereitstellen können. Mit dem Wirkungsgrad des Elektromotors (90 % [42]) und dem Heizwert von Wasserstoff (33,3 kWh_{th}/kg_{H₂}) ergibt sich eine Kapazität von 100 kWh_{el} und eine Leistung von 200 kW_{el}. Bei einer angenommenen Energiespeicherdichte einer Lithium-Ionen Batterie von 0,19 - 0,5 kWh_{el}/L [12] ergibt sich ein Volumen zwischen 200 und 525 L.

Kaltstartfähigkeit

Grundsätzlich ist anzunehmen, dass bei Standzeiten < 10 Stunden und einer angemessenen Isolierung der Freisetzungseinheit keine gravierende Abkühlung zu beobachten sein wird. Anders als ein Verbrennungsmotor ist zudem die Brennstoffzelle mit Betriebstemperaturen < 100 °C schnell temperiert. Ist das System vollständig auf Umgebungstemperatur abgekühlt, so sind drei Szenarien denkbar: 1.) Die Freisetzungseinheit könnte über die Batterie geheizt werden. Diese Lösung ist energetisch wenig sinnvoll, wäre technisch jedoch sehr einfach zu realisieren. Dazu müsste das Fahrzeug stets mit einer gewissen Mindestladung der Batterie abgestellt werden. 2.) Im Falle eines Dual-Fuel Konzeptes könnte der Sekundär-Kraftstoff verbrannt und damit die Freisetzungseinheit temperiert werden. 3.) Durch die Verbrennung einer kleinen Menge des LOHCs kann die Freisetzung zügig auf Betriebstemperatur gebracht werden.

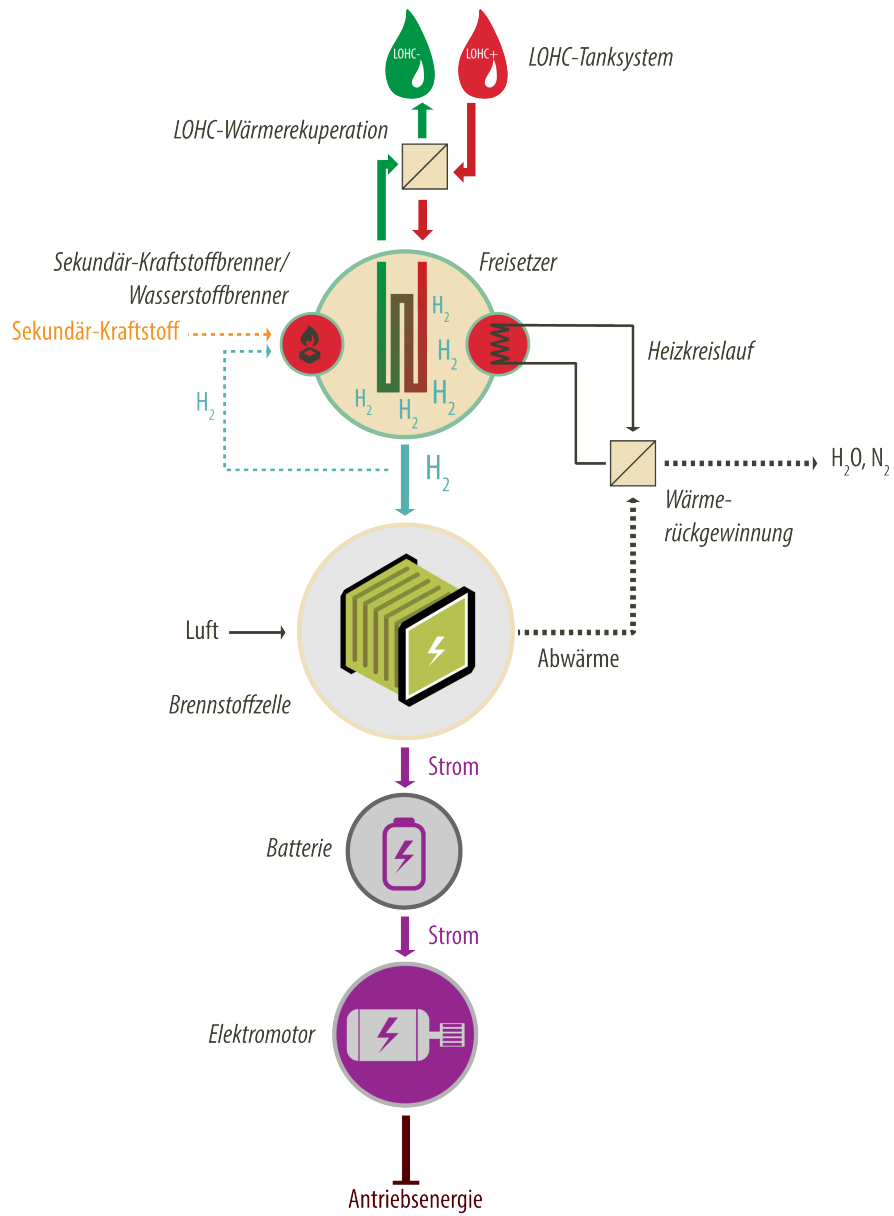


Abbildung 17: LOHC-basierter Antriebsstrang mit on-board Wasserstofffreisetzung und Brennstoffzelle

Emissionen

Die Wandlung des freigesetzten Wasserstoffs mittels einer Brennstoffzelle ist ein Zero-Emission Konzept. Die Reinigung der Abluft ist nicht notwendig.

Wasserstoffreinheit

Hinsichtlich der erforderlichen Wasserstoffreinheit stellt die Brennstoffzelle besondere Anforderungen an die Reinigungsstrecke nach der Freisetzungseinheit. Wie in Kapitel 4.3.5 beschrieben, ist jedoch eine Kondensation dampfförmiger LOHC-Moleküle mit einer einfachen Kühlstrecke realisierbar. Damit liegt bereits eine Reinheit 4.0 (Vol.-% $\leq 99,99\%$) vor. Darüber hinaus können kurzkettige Kohlenwasserstoffe (auftretende Zersetzungsprodukte) über eine Adsorption (bspw. an Aktivkohle) aus dem Wasserstoffstrom abgeschieden werden.

Bilanzierung

» *Wasserstoffbedarf für den Antrieb*

Die Wirkungsgrade einer PEM-Brennstoffzelle und eines Elektromotors werden mit 55 % [37] bzw. 90 % [42] angenommen. Damit ist für die Bereitstellung einer mittleren Antriebsenergie von $130 \text{ kWh}_{\text{mech}}/100 \text{ km}$ eine spezifische Wasserstoffmenge von $263 \text{ kWh}_{\text{H}_2}/100 \text{ km}$ bzw. $7,9 \text{ kg}_{\text{H}_2}/100 \text{ km}$ notwendig.

» *Szenarien zur Bereitstellung der Wärme für die Freisetzungseinheit*

In dieser Bilanz ist der Energiebedarf der Freisetzungseinheit noch unberücksichtigt. Zu diesem Zweck wird auch an dieser Stelle eine Differenzierung zwischen dem best und worst case durchgeführt (Kapitel 4.3.4). Wenn (theoretisch) angenommen wird, dass die Freisetzungseinheit mit der Abwärme der Brennstoffzelle auf der geforderten Temperatur gehalten wird, ist die obige Wasserstoffmenge gleich dem effektiven Bedarf. Im worst-case Szenario sind jedoch $12 \text{ kWh}_{\text{th}}/\text{kg}_{\text{H}_2}$ thermische Energie aufzubringen. Wird diese durch einen Teil des freigesetzten Wasserstoffs und einen Wasserstoffbrenner bereitgestellt, so steigt der spezifische Wasserstoffbedarf auf $12,5 \text{ kg}_{\text{H}_2}/100 \text{ km}$. Im Falle des Dual-Fuel Konzeptes mit Biodiesel ergibt sich ein Dieserverbrauch von $9,5 \text{ L}_{\text{Diesel}}/100 \text{ km}$.

» *Leistungsbilanz ohne Batterie*

Wird der Elektromotor direkt von der Brennstoffzelle gespeist (ohne Batterie), ergibt sich bei einer Durchschnittsleistung von 120 kW im best case Szenario eine geforderte Wasserstoffleistung von $242 \text{ kW}_{\text{H}_2}$. Dies entspricht einer Wasserstoffbereitstellungsrate von $7,3 \text{ kg}_{\text{H}_2}/\text{h}$. In Spitzenlastzeiten (360 kW) ergeben sich $727 \text{ kW}_{\text{H}_2}$ bzw. $21,8 \text{ kg}_{\text{H}_2}/\text{h}$, die der Freisetzer für den Antrieb liefern muss. Im worst case Szenario und unter Berücksichtigung der Bereitstellung des Wasserstoffbedarfs für den H_2 -Brenner sind Wasserstofffreisetzungsraten im Teillast- und Volllastbetrieb von $11,5 \text{ kg}_{\text{H}_2}/\text{h}$ und $34,6 \text{ kg}_{\text{H}_2}/\text{h}$ notwendig ($384 \text{ kW}_{\text{H}_2}$ bzw. $1.152 \text{ kW}_{\text{H}_2}$). Wird Biodiesel für die Wärmebereitstellung eingesetzt, ergeben sich Dieserverbräuche von $8,8 \text{ L}_{\text{Diesel}}/\text{h}$ (Teillast) und $26,3 \text{ L}_{\text{Diesel}}/\text{h}$ (Volllast).

» *Leistungsbilanz mit Batterie*

Durch den Einsatz einer Batterie können die Lastspitzen gedämpft werden und die Wasserstofffreisetzung auf einem (eher) konstanten Level gehalten werden. Die Batterie soll im Volllastbetrieb $180 \text{ kW}_{\text{mech}}$ decken können und muss unter Berücksichtigung des Wirkungsgrads des Elektromotors eine Leistung von $200 \text{ kW}_{\text{el}}$

haben. Für die Kapazität wird ein Wert von $90 \text{ kWh}_{\text{mech}}$ bzw. $100 \text{ kWh}_{\text{el}}$ angenommen. Im Falle der Spitzenlast versorgen der Freisetzer über die Brennstoffzelle sowie die Batterie parallel den Elektromotor. Die Freisetzungseinheit muss somit die verbleibenden $180 \text{ kW}_{\text{mech}}$ Antriebsleistung bereitstellen. Dazu sind im best case Szenario eine Leistung von $364 \text{ kW}_{\text{H}_2}$ und eine Freisetzungsrate von $10,9 \text{ kg}_{\text{H}_2}/\text{h}$ notwendig. Im worst case Szenario ergeben sich mit einem H_2 -Brenner Werte von $576 \text{ kW}_{\text{H}_2}$ und $17,3 \text{ kg}_{\text{H}_2}/\text{h}$. Wird Biodiesel eingesetzt, so ist mit einem Verbrauch von $13,1 \text{ L}_{\text{Diesel}}/\text{h}$ zu rechnen.

» **Erzielbare Reichweite**

Mit Hilfe des mittleren Wasserstoffbedarfs und der Speicherdichte von LOHC⁺ ergibt sich ein spezifischer Bedarf von $154 \text{ L}_{\text{LOHC}^+}/100 \text{ km}$ im best case bzw. $243 \text{ L}_{\text{LOHC}^+}/100 \text{ km}$ im worst case (mit H_2 -Verbrennung). Bei dem angenommenen maximalen LOHC-Tankvolumen von 1.500 L kann für das Szenario ohne Wärmerückgewinnung und H_2 -Brenner eine Reichweite von 615 km angegeben werden. Durch das Dual-Fuel Konzept wird diese Reichweite auf 917 km erweitert. Wird der Energiebedarf des Freisetzers durch die Abwärme der SOFC-Brennstoffzelle gedeckt, ergibt sich eine Reichweite von 974 km . **Tabelle 4** fasst die Ergebnisse der stationären Bilanzierung zusammen.

Tabelle 4: Bilanzierung eines LOHC-basierten Antriebsstrangs mit Brennstoffzelle - spezifischer Wasserstoff- und LOHC-Bedarf, Freisetzungsrate sowie Reichweite ($\eta_{\text{BZ,H}_2} = 55 \%$ [37], $\eta_{\text{BZ,H}_2} = 90 \%$ [42], Hydrierhub: 90%)

	best case	worst case	worst case
	Abwärmenutzung	H_2 -Verbrennung	Dual-Fuel (Diesel)
spez. Wasserstoffbedarf (für $130 \text{ kWh}_{\text{mech}}/100 \text{ km}$)	$7,9 \text{ kg}_{\text{H}_2}/100 \text{ km}$	$12,5 \text{ kg}_{\text{H}_2}/100 \text{ km}$	$7,9 \text{ kg}_{\text{H}_2}/100 \text{ km}$ (+ $9,5 \text{ L}_{\text{Diesel}}$)
spez. LOHC+ Bedarf (für $130 \text{ kWh}_{\text{mech}}/100 \text{ km}$)	$154 \text{ L}_{\text{LOHC}^+}/100 \text{ km}$	$244 \text{ L}_{\text{LOHC}^+}/100 \text{ km}$	$154 \text{ L}_{\text{LOHC}^+}/100 \text{ km}$ (+ $9,5 \text{ L}_{\text{Diesel}}$)
H_2-Freisetzungsrate (Teillast, $120 \text{ kW}_{\text{mech}}$)	$7,3 \text{ kg}_{\text{H}_2}/\text{h}$	$11,5 \text{ kg}_{\text{H}_2}/\text{h}$	$7,3 \text{ kg}_{\text{H}_2}/\text{h}$ (+ $10,3 \text{ L}_{\text{Diesel}}/\text{h}$)
	$242 \text{ kW}_{\text{H}_2}$	$384 \text{ kW}_{\text{H}_2}$	$242 \text{ kW}_{\text{H}_2}$
H_2-Freisetzungsrate (Vollast, $360 \text{ kW}_{\text{mech}}$)	$21,8 \text{ kg}_{\text{H}_2}/\text{h}$	$34,6 \text{ kg}_{\text{H}_2}/\text{h}$	$21,8 \text{ kg}_{\text{H}_2}/\text{h}$ (+ $30,0 \text{ L}_{\text{Diesel}}/\text{h}$)
	$727 \text{ kW}_{\text{H}_2}$	$1.152 \text{ kW}_{\text{H}_2}$	$727 \text{ kW}_{\text{H}_2}$
H_2-Freisetzungsrate (mit $180 \text{ kW}_{\text{mech}}$ Puffer ^(a))	$10,9 \text{ kg}_{\text{H}_2}/\text{h}$	$17,3 \text{ kg}_{\text{H}_2}/\text{h}$	$10,9 \text{ kg}_{\text{H}_2}/\text{h}$ (+ $13,1 \text{ L}_{\text{Diesel}}/\text{h}$)
	$364 \text{ kW}_{\text{H}_2}$	$576 \text{ kW}_{\text{H}_2}$	$364 \text{ kW}_{\text{H}_2}$
Reichweite (bei 1.500 L)	974 km	615 km	917 km

^(a) Die Batterie deckt $180 \text{ kW}_{\text{mech}}$ im Volllastpunkt mit einer Kapazität von $90 \text{ kWh}_{\text{mech}}$ ab. Unter Berücksichtigung des Wirkungsgrads des Elektromotors ($\eta = 90 \%$) muss sie eine Kapazität von $100 \text{ kWh}_{\text{el}}$ aufweisen und eine Leistung von $200 \text{ kW}_{\text{el}}$ bereitstellen.

5.2.3 Diskussion und Vergleich mit Druckwasserstoff

Durch den höheren Wirkungsgrad der Einheit aus Brennstoffzelle und Elektromotor sind grundlegend geringere Wasserstoffmengen für den Antrieb des LKWs zu erwarten. Dies gilt jedoch nur dann, wenn der gesamte im LOHC⁺ gespeicherte Wasserstoff für den Antrieb zur Verfügung steht. Real ist der effektive Wasserstoff- und LOHC-Bedarf stark von der Art der Wärmebereitstellung für die Freisetzungseinheit abhängig. In beiden Konzepten wurde deutlich, dass die Unterschiede zwischen dem worst und best case hinsichtlich der Leistungsanforderung an den Freisetzer gravierend sind, wenn eine Teilverbrennung des freigesetzten Wasserstoffs erfolgt. Der Dual-Fuel Ansatz kann hierbei eine interessante Alternative darstellen, jedoch ist es fraglich, ob eine derartige Lösung gesellschaftliche und politische Akzeptanz erfahren kann. Aufgrund der aufgezeigten (teils) hohen Verbräuche wird diese Variante im Weiteren nicht näher untersucht. Vielmehr ist die Kernfrage, welcher Anteil des Energiebedarfs der Freisetzungseinheit durch eine interne Wärmerückgewinnung gedeckt werden kann. Im Falle des Verbrennungsmotors steht hier die Abgaswärme und im Falle der Brennstoffzelle die Abwärme zur Verfügung.

So kann beispielsweise ein Wasserstoffmotor trotz des geringeren Komponentenwirkungsgrads durch das (möglicherweise) höhere Potenzial zur internen Wärmerückgewinnung eine bessere Gesamtperformance erzielen. Die PEM Brennstoffzelle wird mit einer Betriebstemperatur von 80 °C wohl keinen Beitrag zum Wärmebedarf der Freisetzungseinheit liefern können. In diesem Kontext könnte über den Einsatz einer SOFC Brennstoffzelle nachgedacht werden. Die grundlegende Kompatibilität der SOFC mit dem LOHC Konzept wurde an der Universität Erlangen-Nürnberg untersucht und für stationäre Anwendungen als äußerst positiv bewertet [83]. Die hohe Betriebstemperatur sowie die permanente Beheizung (auch bei Standzeiten des LKWs) spricht zunächst gegen den Einsatz in der Mobilität. Allerdings muss berücksichtigt werden, dass durch das hohe Temperaturniveau womöglich eine vollständige Bereitstellung des Wärmebedarfs der Freisetzungseinheit möglich ist. Letzten Endes ist eine Gegenüberstellung des Energiebedarfs für die (permanente) Temperierung der SOFC und der im Falle eines SOFC-LOHC-Antriebsstrangs entfallenden Zuheizung der Freisetzungseinheit notwendig.

Unabhängig von dem Anteil der thermischen Energie, die durch eine interne Wärmerückgewinnung der Freisetzungseinheit zur Verfügung gestellt werden kann, ist an dieser Stelle ein Vergleich der Produkteffizienz mit der Speicherung des elementaren Wasserstoffs bei 700 bar interessant. Dazu sind in **Abbildung 18** das spezifische Wasserstoffspeichervolumen in L/kWh_{mech} gegen den spezifischen Energiebedarf der Elektrolyse in $kWh_{\text{el}}/kWh_{\text{mech}}$ für das Verbrennungsmotor- und PEM-Brennstoffzellenkonzept aufgetragen. Unter Berücksichtigung des Wirkungsgrades des Wasserstoffverbrennungsmotors bzw. der Brennstoffzelle sowie der Wasserstoffdichte bei 700 bar kann das spezifische Volumen in $L_{H_2-700\text{bar}}/kWh_{\text{mech}}$ berechnet werden. Für den elektrischen Energieeinsatz sind zudem der Elektrolysewirkungsgrad und der Energiebedarf der Kompression zu berücksichtigen. Ausgehend von der Charakteristik des Druckwasserstoffs (Datenpunkte in **Abbildung 18** a) und b)) lassen sich vier Quadranten einzeichnen. Diese geben an, ob ein größeres oder kleines spezifisches Speichervolumen (V) bzw. ein höherer oder geringerer spezifischer elektrischer Energiebedarf (E) im Vergleich zum Druckwasserstoffkonzept notwendig ist.

Unter Berücksichtigung des worst und best case Szenarios der LOHC-basierten Antriebskonzepte kann ein Bereich angegeben werden, in der das spezifische Speichervolumen und der elektrische Energiebedarf der obigen Konzepte liegen.

Im Falle des Wasserstoffverbrennungsmotors zeigt sich, dass je nach Deckungsgrad des Energiebedarfs der Freisetzungseinheit sowohl eine deutliche Verbesserung im Speichervolumen des LOHC (v) als auch im elektrischen Primärenergiebedarf (E) ($V\downarrow, E\downarrow$) als auch eine Verschlechterung ($V\uparrow, E\uparrow$) bei dem Einsatz des LOHCs erzielt werden kann. Dies ist in **Abbildung 18** gezeigt. Auf der Ordinate ist die elektrische Primärenergie aufgetragen, die zur Wasserstoffbildung benötigt wird. Die Abszisse zeigt das Volumen an LOHC, das gespeichert werden muss. Wird zumindest ein geringer Teil der Dehydrierwärme durch eine interne Wärmerückgewinnung, hier durch Wasserstoffverbrennung, bereitgestellt, so ist zwar ein erhöhter elektrischer Energiebedarf im Vergleich zur Druckwasserstoffspeicherung zu erwarten, allerdings sinkt das spezifische Speichervolumen. Der erhöhte Energiebedarf resultiert aus der größeren Wasserstoffmenge, die für den Wasserstoffbrenner bereitgestellt werden muss, und nicht für den eigentlichen Antrieb des LKWs zur Verfügung steht.

Im Falle der PEM-Brennstoffzelle können identische Ergebnisse beobachtet werden (**Abbildung 18 b**). Werden zumindest geringe Anteile des thermischen Energiebedarfs der Freisetzungseinheit gedeckt, ist eine positive Bewertung des LOHC-Konzeptes hinsichtlich des erzielbaren spezifischen Speichervolumens zulässig.

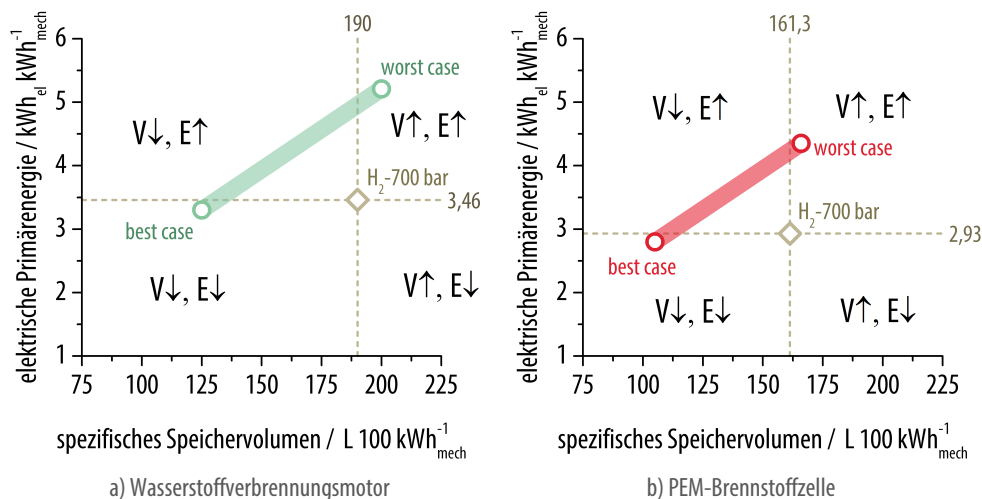


Abbildung 18: Gegenüberstellung von Druckwasserstoff-basierten und LOHC-basierten Antriebskonzepten hinsichtlich des stofflichen Speichervolumens und des spezifischen Strombedarfs für die Elektrolyse (elektrische Primärenergie) für den Antrieb (Annahmen analog zu Kapitel 3.2)

Aus dieser Betrachtung wird jedoch auch ersichtlich, dass selbst im worst case keine gravierend schlechtere spezifische LOHC-Speicherdichte als bei der Druckwasserstoffspeicherung erzielt wird. Durch eine minimale (interne) Wärmeintegration sind mit den LOHC-basierten Antriebskonzepten höhere Reichweiten als bei der Druckwasserstoffspeicherung erzielbar – auch wenn die absoluten Werte mit grob 500 bis 1.000 km bei $1.500 L_{LOHC+}$ im Vergleich zu dieselbetriebenen LKWs gering sind.

Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass zur Bereitstellung der Spitzenlast von 360 kW hohe Wasserstofffreisetzungsraten $> 30 \text{ kg}_{\text{H}_2}/\text{h}$ notwendig sind. Bei einer mittleren Leistung des LKWs von 120 kW sind hingegen Wasserstoffströme von circa $10 \text{ kg}_{\text{H}_2}/\text{h}$ gefordert. Die Abbildung der kurzzeitigen Leistungsspitzen des Freisetters verlangt eine Überdimensionierung der gesamten Freisetzungseinheit. Dies erscheint keinesfalls als

zweckmäßig. Darüber hinaus ist davon auszugehen, dass die Freisetzungseinheit schnellen Lastwechseln (bis zu Faktor 3) nicht folgen kann. Die Einbeziehung eines Leistungspuffers in Form eines H₂-Speichers oder einer Batterie sollte somit bedacht werden. Damit kann die Freisetzungseinheit bei einem nahezu konstanten Betriebspunkt arbeiten und zudem deutlich kleiner dimensioniert werden. Wasserstoffleistungen von maximal 679 kW_{H₂} bzw. 20,4 kg_{H₂}/h (Verbrennungsmotor, worst case mit H₂-Brenner) wurden hierbei ermittelt.

Essentieller Punkt ist die geforderte Reinheit des freigesetzten Wasserstoffs. Es ist davon auszugehen, dass im Falle der Nutzung eines Verbrennungsmotors eine einfache Kühlung des Wasserstoffstromes nach dem Freisetzer ausreicht. Das in geringen Konzentrationen in die Dampfphase übergegangene LOHC wird dabei weitgehend kondensiert und abgeschieden. Wie in Kapitel 4.3.5 bereits erläutert, stellen die in geringen Anteilen im Wasserstoffstrom enthaltenen Kohlenwasserstoffe kein grundlegendes Risiko für die Brennstoffzelle bzw. deren Membran dar. Vor allem bei hohen Lasten und in Langzeitversuchen sollte dies jedoch detailliert untersucht werden, um die geforderten 20.000 bis 25.000 Betriebsstunden [84] zu erzielen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass ein LOHC-basierter Antriebsstrang theoretisch in der Lage ist, die definierte Mindestreichweite von 800 km bei einem maximalen Tankvolumen von 1.500 L abzubilden. Voraussetzung ist jedoch ein hoher Wirkungsgrad des Wasserstoffverbrennungsmotors sowie der Brennstoffzelle. Um einen klaren Vorteil gegenüber der Druckwasserstoffspeicherung in Kontext der Speicherdichte und Reichweite zu erzielen, ist zumindest ein geringer Anteil der benötigten thermischen Energie für die Freisetzungseinheit durch eine interne Wärmeregeneration zu decken.

6 Wie sieht die LOHC-Infrastruktur aus?

Die Einführung eines neuen Kraftstoffs gleicht dem „Henne-Ei“ Problem: Eine neue Antriebstechnologie kann sich am Markt nicht ohne eine entsprechende Infrastruktur etablieren. Gleichzeitig wird die Kraftstoffinfrastruktur nicht ausgebaut, wenn es keinen Absatzmarkt für den Kraftstoff gibt. Dieses Dilemma kann nicht generell gelöst werden. Allerdings kann durch die frühzeitige Berücksichtigung der folgenden Fragestellungen die Planung deutlich strukturierter ablaufen [85].

1. Welche grundlegenden Ziele gibt es?

Bei dem Aufbau einer Wasserstoff-Infrastruktur muss vorab geklärt werden, ob eine ganzheitliche Emissionsfreiheit angestrebt oder für die Einführungsphase auch die Nutzung von grauem (aus Erdgas) Wasserstoff akzeptiert wird. Der Unterschied dieser beiden Szenarien liegt in der Art der Wasserstoffherzeugung und damit auch der Versorgungsstruktur. Regenerativer Wasserstoff wird mittels Elektrolyse erzeugt. Der Elektrolyseur muss entweder über eine Hochspannungsleitung mit dem Übertragungsnetz verbunden sein oder am Ort eines Wind-/Solarparks betrieben werden. Sowohl eine zentrale als auch dezentrale H₂-Bereitstellung ist somit denkbar. Die Herstellung von grauem Wasserstoff muss nahe einer Erdgaspipeline erfolgen, ist damit nur zentral möglich.

2. Betriebsmodus und technische Randbedingungen

Das oben genannte „Henne-Ei“ Problem muss bei der Strategieplanung der Kapazitäten und des Ausbaus der Infrastruktur bedacht werden. Fragestellungen wie „Wie viele Fahrzeuge sollen versorgt werden?“ oder „Wie viele Kilometer sollen diese Fahrzeuge zurücklegen können?“ sind für die ersten Schritte bei der Einführung eines neuen Kraftstoffs essentiell. Gleichzeitig sollten Szenarien für den weiteren Ausbau festgelegt werden. Beeinflusst werden diese Aspekte durch eine Reihe von Rahmenbedingungen. Ist der neue Kraftstoff beispielsweise leicht in aktuelle Strukturen integrierbar, sinkt der technische und finanzielle Aufwand zur Verbreitung dieses Energieträgers auf dem Markt. Dennoch sind auch in dieser Planungsphase regulatorische und lokale Rahmenbedingungen zu berücksichtigen. Insbesondere dem Platzbedarf der Tankstellen sowie deren Gestaltungsmöglichkeiten sind hierbei Grenzen gesetzt.

3. Ökonomische und politische Aspekte

Damit eine nachhaltige Einführung und Etablierung des neuen Kraftstoffs möglich ist, sind bereits in einem frühen Stadium ökonomische sowie politische Randbedingungen zu berücksichtigen. In einigen Aspekten ist es sicherlich schwer Aussagen über die zukünftigen Entwicklungen zu machen. Alle Themen jedoch, die den neuen Kraftstoff tangieren müssen vorab detailliert betrachtet werden. Darunter fallen beispielsweise die Art der Abrechnung des Kraftstoffs sowie dessen gesetzliche Besteuerung. Darüber hinaus müssen Regelwerke bzw. Normen verfasst werden, die dem Verbraucher eine Art Qualitäts- und Versorgungssicherheit garantieren.

Im Rahmen dieser Machbarkeitsstudie können sicherlich nicht alle obigen Faktoren und Aspekte berücksichtigt werden. Es ist jedoch wichtig, die Grundlagen einer LOHC-basierten Infrastruktur darzulegen und die Besonderheiten zu beleuchten. Insbesondere die Tatsache, dass LOHCs lediglich als Trägerstoff fungieren und selbst nicht verbraucht werden, verlangt spezielle regulatorische, ökonomische und technische Maßnahmen.

6.1 Szenarien einer LOHC-Infrastruktur

Grundlegende Motivation dieser Studie ist, ein Konzept zur Emissionsminderung des Verkehrssektors zu analysieren. Konsequenterweise wird angenommen, dass der für den Antrieb der LKWs notwendige Wasserstoff via Elektrolyse und regenerativem Strom bereitgestellt wird. Die Verwendung von grauem Wasserstoff bleibt hier unberücksichtigt. **Abbildung 19** zeigt das allgemeine Schema der LOHC-Infrastruktur.

Ein Elektrolyseur wird von Photovoltaik- oder Windstrom gespeist und stellt regenerativen Wasserstoff bereit. In einer stationären Hydriereinheit wird der Wasserstoff anschließend chemisch an den LOHC gebunden. Der wasserstoff-reiche LOHC⁺ wird dann in einer Tankstelle gelagert und bei Bedarf von den Fahrzeugen getankt. Im Fahrzeug selbst erfolgt die Wasserstofffreisetzung unter Bildung des wasserstoff-armen LOHC. Dieses wird bei der nächsten Betankung an der Tankstelle abgegeben (bzw. gegen LOHC⁺ getauscht), gelagert und schließlich der stationären Hydriereinheit zur erneuten Beladung zugeführt.

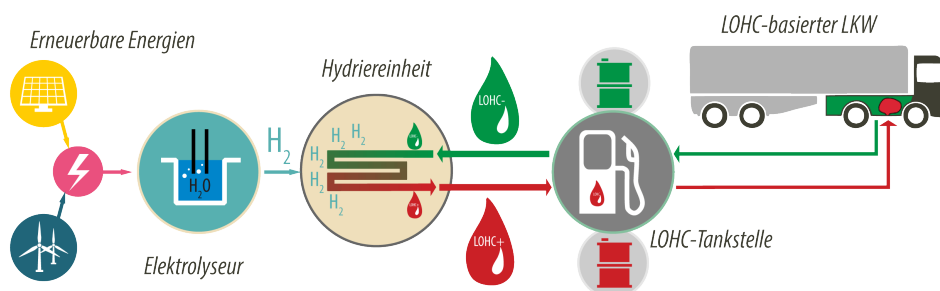


Abbildung 19: Allgemeines Schema der LOHC-Infrastruktur

Grundlegend können bei einer LOHC-Infrastruktur zwei Szenarien angedacht werden. Differenziert wird hierbei nach dem Ort an dem der Wasserstoff erzeugt wird. Bei einer zentralen Wasserstoffbereitstellung (siehe **Abbildung 20**) befindet sich der Elektrolyseur und die Hydriereinheit nicht am Ort der Tankstelle. Dabei könnte beispielsweise angedacht werden, diese beiden Komponenten in der Nähe eines Wind- bzw. Solarparks oder eines Industriegebietes zu installieren. Dort wird im großen Maßstab Wasserstoff hergestellt und chemisch an den LOHC gebunden. Die Verteilung des LOHC⁺ erfolgt anschließend straßengebunden mit Tanklastwagen. Die Tankstelle selbst hat je einen Tank für LOHC⁺ und LOHC. Das angelieferte LOHC⁺ wird vom Tanklastwagen in den entsprechenden Lagertank gefördert und steht an der Tankstelle für die Betankung von Fahrzeugen zur Verfügung. Auf dem Rückweg zum Wind- bzw. Solarpark nimmt der Tanklastwagen entladenes LOHC⁻ mit, welches dann vor Ort erneut beladen werden kann.

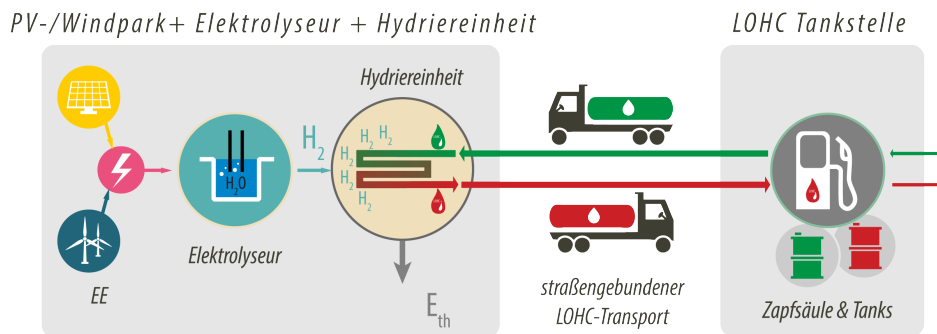


Abbildung 20: LOHC-Infrastruktur mit einer zentralen Wasserstoffbereitstellung

Eine Alternative dazu ist die dezentrale Wasserstoffherzeugung (**Abbildung 21**). Dabei wird der Elektrolyseur direkt an der Tankstelle betrieben. Zu diesem Zweck muss die Tankstelle über eine Hochspannungsleitung mit dem Elektrizitätsnetz verbunden sein. An der Tankstelle wird der hergestellte Wasserstoff in der Hydriereinheit an den LOHC gebunden und dieser in den entsprechenden Lagertanks gespeichert.

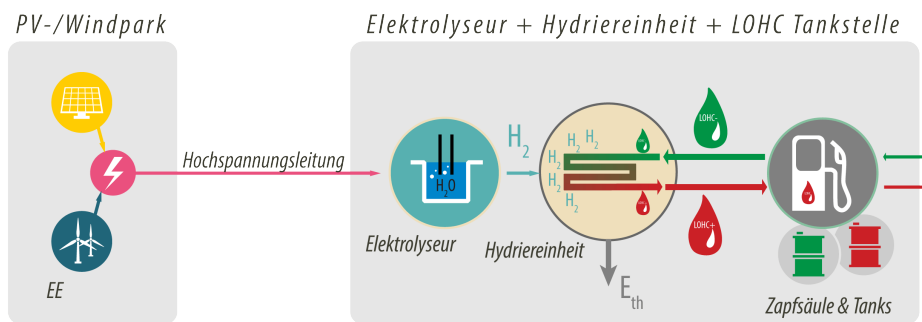


Abbildung 21: LOHC-Infrastruktur mit einer dezentralen Wasserstoffbereitstellung

Beiden Varianten können Vor- und Nachteile zugeschrieben werden. Im Falle der zentralen H₂-Bereitstellung wirken sich die großen Anlagen sicherlich positiv auf die spezifischen Kosten aus. Gemäß der Kapazitätsmethode chemischer Anlagen sind sowohl geringere Investitionskosten als auch reduzierte Betriebskosten zu erwarten. Demgegenüber stehen der hohe Transportaufwand und die damit verbundenen Kosten (vgl. Kapitel 6.5). Durch eine dezentrale Wasserstoffherzeugung entfällt der Transport von LOHC. Ob aktuelle Tankstellen eine gesicherte Anbindung an das Hochspannungsnetz vorweisen ist jedoch fraglich. Falls nicht, so ist die Nachrüstung mit großen Kosten verbunden. Darüber hinaus könnte die Verfügbarkeit ausreichender Stellflächen für die Komponenten ein limitierender Faktor sein. Ein weiterer Aspekt ist die Nutzung der bei der Hydrierung freigesetzten thermischen Energie. Mit der Wärmemenge von 9 kWh_{th}/kg_{H₂} und Temperaturen über 150 °C könnte sowohl ein Industriepark oder ein Nah-/Fernwärmenetz versorgt werden.

All diese Einflussfaktoren müssen bei der Konzeptionierung der LOHC-Infrastruktur berücksichtigt werden. Beide Szenarien haben ihre Berechtigung, allerdings sind die lokalen Gegebenheiten detailliert zu prüfen.

In der Konsequenz ist die Einführung einer Wasserstoffversorgung eine Abkehr von den heute Energie liefernden Ländern wie Russland (Gas), Saudi-Arabien (Öl) oder Australien (Kohle). Damit wird auch die Bedeutung der Erdölfirmen reduziert, die heute im wesentlichen Logistikfirmen sind, die die richtige Energiemenge zur richtigen Zeit am richtigen Ort bereitstellen. Kurzfristig kann der Wasserstoff nicht vollständig aus deutschen regenerativen Quellen hergestellt werden. An diese Stelle treten neue Lieferländer wie Nord-Afrika, südeuropäische Länder, Island oder Kanada.

6.2 LOHC – ein Kraftstoffkreislauf mit Pfand

Im Vergleich zum Vertrieb konventioneller Kraftstoffe ergeben sich bei dem LOHC-Konzept entscheidende Besonderheiten. Da der LOHC nur als Energie Tragender Stoff fungiert und somit während der Energiebereitstellungskette nicht verbraucht wird, ist bei dem Bezug bzw. der Nutzung des Kraftstoffs ein Umdenken notwendig. Der LOHC wird nur als Mittel zum Zweck eingesetzt und kann vom Verbraucher „geliehen“ werden, um Wasserstoff je nach Bedarf zu erhalten. Ähnlich wie bei Gasflaschen ist somit eine Art Pfandsystem für das LOHC denkbar. Dabei muss der Verbraucher die erstmalige LOHC Befüllung kaufen. An der Tankstelle kann er nun in gleicher Menge wasserstoffarmes LOHC⁻ abgeben und wasserstoffreiches LOHC⁺ beziehen. Zu bezahlen ist dabei lediglich die getankte Energie in Form von gebundenem Wasserstoff, nicht das LOHC selbst. In diesem Kontext kommt es zu einer weiteren Besonderheit. Konventionelle Kraftstoffe unterliegen Normen, die deren Zusammensetzung und deren Heizwert festlegen. Beim Verkauf kann die Abrechnung der Energiemenge somit direkt über die bezogene Masse (bzw. in der Regel über das Volumen) erfolgen. Im Falle von LOHC kommen hierbei zwei weitere Freiheitsgrade hinzu und es müssen zum aktuellen Zeitpunkt drei Größen berücksichtigt werden:

1. Wie viel LOHC⁺ wird bezogen?
2. Welchen Hydriergrad hat das LOHC⁺?
3. Welchen Hydriergrad hat das im Pfandsystem zurückgegebene LOHC?

Die Bestimmung der Menge des bezogenen Kraftstoffs (hier LOHC⁺) ist keine Neuerung. Aufgrund der temperaturabhängigen Dichte der Flüssigkeiten sollte dies gravimetrisch erfolgen. Allerdings könnte die Abrechnung auch über das geförderte Volumen in Verbindung mit einer Temperaturkorrelation erfolgen. Diese Vorgehensweise ist bei konventionellen Kraftstoffen üblich. Um die Energiemenge (in Form von gebundenem Wasserstoff) abzurechnen, ist neben der Bezugsmenge auch der Hydriergrad des LOHC⁺ zu bestimmen. Dabei kann ähnlich wie bei Diesel und Benzin eine Norm eine feste Untergrenze (bspw. 98 % Hydriergrad) definieren, oder es muss vor Ort der genaue Wasserstoffgehalt des getankten LOHC⁺ gemessen werden. Auf Basis der bezogenen Menge an LOHC⁺ und dessen Wasserstoffbeladung kann eine energiebasierte Abrechnung erfolgen.

Der Verbraucher nutzt das LOHC⁺ schließlich zum Antrieb des Fahrzeugs, indem der Wasserstoff freigesetzt und einem Verbrennungsmotor oder einer Brennstoffzelle zugeführt wird. Zurück an der Tankstelle wird gemäß dem obigen Pfandsystem das LOHC⁻ entladen und neues LOHC⁺ bezogen. Dabei ist zu beachten, dass der Hydriergrad des zurückgegebenen LOHC nicht durch eine Norm oder Ähnlichem vorgegeben werden kann. Real hängt diese Größe stark von der fahrzeugseitigen Freisetzungseinheit ab. So kann beispielsweise bei hohen Lastanforderungen oder auch ungünstigen Betriebsbedingungen nur eine Teilfreisetzung des Wasserstoffs erfolgen. An der Tankstelle würde somit eine

gewisse Energiemenge in Form von noch nicht freigesetztem Wasserstoff im LOHC zurückgegeben werden. Da dem Verbraucher jedoch Bezug von LOHC⁺ die Menge an gebundenem Wasserstoff abgerechnet wird, liegt die Überlegung nahe, die nicht genutzte (nicht freigesetzte) Wasserstoffmenge als Gutschrift zu verbuchen. Dazu müsste an der Tankstelle der Wasserstoffgehalt des zurückgeführten LOHC⁻ gemessen werden.

6.3 Teilkomponenten der LOHC-Infrastruktur

Unabhängig davon, ob eine zentrale oder dezentrale Wasserstoffbereitstellung erfolgt, sind für eine LOHC-Infrastruktur eine Reihe von Einzelkomponenten und –anlagen notwendig. Besonderheiten ergeben sich insbesondere an der Tankstelle beim Tankvorgang.

Die LOHC-Bereitstellungskette beginnt mit dem Einsatz erneuerbarer Energien für die Speisung des Elektrolyseurs. Dabei sind an die Wind- bzw. Solarparks keine spezifischen Anforderungen in Verbindung mit dem LOHC-Konzept zu berücksichtigen. Anders beim Elektrolyseur. Dabei stehen grundsätzlich drei Elektrolyseverfahren zur Verfügung: die alkalische Elektrolyse, die Proton-Exchange-Membran (PEM) Elektrolyse und die Solid-Oxide-Elektrolyse. In Verbindung mit regenerativen Stromquellen weist die Solid-Oxide-Elektrolyse Nachteile auf: Die hohen Laborwirkungsgrade von circa 85 % fordern spezifische Betriebspunkte, die insbesondere durch Temperaturen von 700 bis 900 °C [28] charakterisiert sind. Die Aufrechterhaltung dieses Temperaturniveaus mit volatilen erneuerbaren Energien ist fraglich. Die alkalische und PEM-Elektrolyse arbeiten beide bei 60 bis 80 °C. Neben den Unterschieden in den ablaufenden physikalischen Prozessen sind die Verfahren durch unterschiedliche Betriebsdrücke charakterisiert. Dies kann für das LOHC-Konzept eine wichtige Rolle spielen, da wie in Kapitel 4.3.1 erläutert, die Hydrierung des LOHC⁻ bei Drücken > 20 bar abläuft. Während die PEM-Elektrolyse standardmäßig bei Drücken um 30 bar arbeitet, gibt es bei der alkalischen Elektrolyse sowohl ein druckloses (atmosphärische Elektrolyse) als auch druck-beaufschlagtes Verfahren (circa 30 bar). Wird demnach ein druckloser Elektrolyseprozess eingesetzt, so ist der hergestellte Wasserstoff mit einem Kompressor auf den Betriebsdruck der Hydriereinheit zu bringen. Der Vorteil der etwas höheren Wirkungsgrade der alkalischen Elektrolyse gegenüber der PEM-Elektrolyse könnte damit reduziert werden (PEM: 65-78 % bzw. alkalisch: 65-82 % [28]). Im Falle einer PEM-Elektrolyse oder einer druck-beaufschlagten alkalischen Elektrolyse könnte der bereitgestellte Wasserstoff (nach einer Trocknung von Wasser) direkt zur Hydrierung des LOHC⁻ eingesetzt werden.

Der erzeugte Wasserstoff wird bei Drücken > 20 bar und Temperaturen < 300 °C in der Hydriereinheit an das LOHC gebunden. Hierbei muss insbesondere auf die während der Hydrierung freigesetzte thermische Energie hingewiesen werden. Bei der Bereitstellung von 100 L_{LOHC+} fallen circa 50 kWh_{th} auf einem hohen Temperaturniveau an. Steht kein geeigneter Wärmeabnehmer zur Verfügung, so ist über einen Kühlkreislauf diese Energie an die Umgebung abzuführen. Zur Optimierung des Gesamtsystems ist jedoch eine Nutzung dieser Wärme anzustreben.

Im Falle einer zentralen Elektrolyseeinheit erfolgt der Transport von LOHC⁺ bzw. LOHC⁻ straßengebunden mit Hilfe von Flüssigkraftstoff-Trailern, per Schiene oder Schiff. Wie in Kapitel 4.3.6 erläutert, ist sowohl das wasserstoff-reiche als auch das wasserstoff-arme LOHC nicht als Gefahrgut klassifiziert. Durch die (teils) hohe Viskosität des LOHCs bei Umgebungstemperatur ist eine schnelle gravimetrische Entladung unter Umständen nicht möglich. Die Förderung per

Pumpe in bzw. aus dem Kraftstofftrailer kann erforderlich sein. Wird von keiner vollständigen Be- und Entladung an der Tankstelle ausgegangen, so muss der Trailer mit einem Mehrkammertank ausgestattet werden.

Analoges gilt auch für die Förderung und Lagerung des LOHCs an der Tankstelle. Die Pumpe der Zapfsäule muss entsprechend der hohen Viskosität ausgelegt sein, was heute bereits realisiert ist. Durch einen Mehrkammertank muss unterirdisch LOHC^+ von LOHC^- getrennt gespeichert werden. Die im vorherigen Kapitel beschriebene Hydriergradbestimmung von LOHC^+ kann entweder einmalig pro Station oder an jeder Zapfsäule separat durchgeführt werden. Soll eine Gutschrift für den im LOHC^- verbliebenen Wasserstoffanteil an der Tankstelle erfolgen, so ist die Hydriergradbestimmung während der Förderung aus dem Verbraucher-Fahrzeug in den Lagertank der Tankstelle durchzuführen. Da nicht bekannt ist, ob der Tank ideal durchmischt ist, muss eine Norm festlegen, wie oft der Hydriergrad bei einem Tankvorgang bestimmt wird.

Die Förderung des LOHC^+ in das Fahrzeug bzw. die des LOHC^- aus dem Fahrzeug sollte aus Zeitgründen gleichzeitig erfolgen. Dazu können entweder zwei separate oder eine kombinierte Zapfpistole eingesetzt werden. Die Förderung von LOHC^- aus dem Tank kann durch eine Ansaugung der Flüssigkeit oder im Fall eines Diaphragmatanks durch ein Verpressen von LOHC^+ und der damit verbundenen Verdrängung des LOHC^- erfolgen. Da eine Absaugung bzw. eine Aufnahme des LOHC^- unter Druck erfolgt, muss von einer geschlossenen (dichten) Verbindung zwischen der Zapfpistole und dem fahrzeugseitigen LOHC^- -Tankstutzen ausgegangen werden. Im Falle von zwei separaten Zapfpistolen übernimmt eine das Pumpen von LOHC^+ in den Tank und die andere die Aufnahme (Saugen) des LOHC^- aus dem Fahrzeug. Alternative könnte eine kombinierte (zweiflutige) Zapfpistole eingesetzt werden. Dabei werden in der Zapfpistole je eine Leitung für LOHC^+ und LOHC^- vorgesehen.

6.4 Gesetzliche Rahmenbedingungen

Hinsichtlich der gesetzlichen und politischen Rahmbedingungen sind bei einer LOHC-basierten Wasserstoffinfrastruktur einige Besonderheiten zu berücksichtigen. Dabei ist von dem klassischen Begriff des „Kraftstoffs“ Abschied zu nehmen: LOHC ist selbst kein Kraftstoff, sondern lediglich der Träger des eigentlichen Kraftstoffs Wasserstoff. Daher sollte die Regel nach ADR (max. 1500 L Kraftstoff) nicht gelten.

Der heutige Preis von Druckwasserstoff an Tankstellen ist gesetzt und unterliegt noch nicht marktwirtschaftlichen Regelungen. Es wäre konsequent, diese Vorgehensweise auch für LOHC zu nutzen.

Wird LOHC im großen Maßstab als Wasserstoffträger oder Kraftstoff eingesetzt, so sind darüber hinaus internationale Regelungen für das in Kapitel 6.2 beschriebene Pfandsystem zu definieren.

Im Moment zahlen Betreiber von Elektrolyseuren eine Reihe von Umlagen, darunter auch die EEG-Umlage. Dies verteuert das Produkt Wasserstoff erheblich. Es wird vorgeschlagen, keinerlei Abgaben auf die Elektrizität zu erheben, die Wasserstoff für LOHC produziert.

Sowohl die Vertreter des LKW-Fernverkehrs als auch die Vertreter der Automobilindustrie wiesen vehement darauf hin, dass sich der Transport durch Einführung einer neuen Technologie nicht verteuern darf. Zumindest in einer Übergangszeit sind daher Anreize und Regelungen notwendig. Diese können darin bestehen, die Maut für CO₂-emittierende

Schwerlastkraftwagen zu erhöhen und für CO₂-freie Fahrzeuge zur Not bis auf Null zu vermindern. Deutschland als zentrales Land in Europa könnte so einen nicht unerheblichen Impuls für seine Nachbarstaaten setzen.

Deutschland ist in Zugzwang geraten, denn in der Stadt Wuhan wird am 20.9.2017 ein Bus vorgestellt, der mit LOHC und Brennstoffzelle betrieben wird. Das Land, das den Motor erfunden hat, gerät in Zugzwang.

6.5 Energie- und Leistungsbilanzierung einer Tankstelle

Im Kontext der hier diskutierten Szenarien einer LOHC-Infrastruktur ist ein Blick auf die täglich bereitgestellten Energiemengen und Leistungen einer konventionellen Tankstelle zu richten. An einer durchschnittlichen Tankstelle können circa 180.000 L_{Kraftstoff} gelagert werden. Alle zwei Tage wird die Tankstelle mit 28.000 L_{Kraftstoff} beliefert. Daraus lässt sich schließen, dass der tägliche Absatz von Diesel und Benzin in Summe circa 14.000 L_{Kraftstoff} beträgt [86].

Wird angenommen, dass 40 % Diesel und 60 % Benzin verkauft werden, kann über die Heizwerte der Kraftstoffe die täglich abgegebene thermische Energiemenge ermittelt werden. Durch die Einbeziehung der Wirkungsgrade eines Diesel- und Benzinmotors lässt sich zudem die bereitgestellte Antriebsenergie bestimmen. Gleichzeitig kann über eine identische Vorgehensweise die an der Tankstelle gelagerte thermische Energie und Antriebsenergie berechnet werden. Aus der Öffnungszeit der Tankstelle und der täglich verkauften Energiemenge ergibt sich zudem eine Art mittlere Leistungsabgabe. Die Ergebnisse für die oben beschriebene konventionelle Tankstelle sind in **Tabelle 5** gelistet.

Tabelle 5: Energiebilanzierung einer konventionellen (fossilen) Tankstelle (Annahme: 24 h geöffnet)

	Bereitstellung	Bevorratung
Konventioneller Kraftstoff	14.000 L _{Kraftstoff} /d	180.000 L _{Kraftstoff}
thermische Energie	135 MWh _{th} /d	1,73 GWh _{th}
Antriebsenergie	54 MWh _{mech} /d	0,69 MWh _{mech}
mittlere thermische Leistung	5,6 MW _{th}	
mittlere Antriebsleistung	2,3 MW _{mech}	

Soll nun eine derartige konventionelle Tankstelle ihre Kunden mit regenerativen Kraftstoffen versorgen, so muss die identische Antriebsenergie zur Verfügung gestellt werden, um die Mobilität und Versorgungssicherheit aufrecht zu erhalten. Wird als regenerativer Kraftstoff Wasserstoff angenommen, so kann die Menge an bevorratetem und abgegebenen Druckwasserstoff sowie LOHC⁺ ermittelt werden. Wie bereits erläutert, kann dabei zwischen der Erzeugung des Wasserstoffs via Elektrolyse an der Tankstelle – also dezentral – oder an einem zentralen Ort differenziert werden. Bei der zentralen Bereitstellung ist damit ein Wasserstofftransport notwendig. Wird der Wasserstoff an der Tankstelle hergestellt, so ist eine Anbindung der Tankstelle an das Stromnetz erforderlich.

Für die folgende Bilanzierung wird angenommen, dass bei einer zentralen Bereitstellung des Wasserstoffs der Transport vom Ort der Erzeugung bis zur Tankstelle mittels Druckwasserstoff- oder LOHC⁺-Trailer erfolgt. Dabei werden als maximale Kapazitäten 530 kg_{H2}/Trailer im Falle des Druckwasserstoffs und 30.000 L_{LOHC⁺}/Trailer (1.800 kg_{H2}) im Falle des LOHCs angenommen. Die fahrzeugseitige Umsetzung des Wasserstoffs in Antriebsenergie erfolgt mittels Brennstoffzelle ($\eta = 55\%$) und Elektromotor ($\eta = 90\%$). Die **Tabelle 6** zeigt die Ergebnisse der Bilanzierung.

Tabelle 6: Bilanzierung einer Wasserstofftankstelle – Differenzierung zwischen 700 bar Druckwasserstoff und LOHC als

Wasserstoffträger		
	Bereitstellung	Bevorratung
Wasserstoffmenge	3.600 kg _{H2} /d	46.200 kg _{H2}
Mittlere Wasserstoffleistung	5,0 MW _{H2}	
Mittlere Wasserstoffbereitstellung	150 kg _{H2} /h	
Volumen		
Druckwasserstoff (700 bar)	92.000 L/d	1.180.000 L
LOHC ⁺	63.000 L/d	810.000 L
Zentral - Belieferung per Trailer		
Druckwasserstoff (700 bar)	6,8 Trailer/d	
LOHC ⁺	2 Trailer/d	
Dezentral - Stromanbindung		
Strombedarf	171 MWh _{el}	
Mittlere Anschlussleistung	7,1 MW _{el}	

Zur Bereitstellung der gleichen Antriebsenergie müssen täglich 3.600 kg_{H2} verkauft werden. Dies entspricht einer mittleren Wasserstoffbereitstellungsrate von 150 kg_{H2}/h. Die an einer konventionellen Tankstelle bevorratete Antriebsenergie (in Form von 180.000 L_{Kraftstoff}) entspricht einer Wasserstoffmenge von 46.200 kg_{H2}. Soll dieser bei 700 bar in elementarer Form gelagert werden, ergibt sich ein Tankvolumen von 1.180 m³. Bei einer Speicherung dieser Wasserstoffmenge in LOHCs wäre ein Tank mit 810 m³ notwendig. Verglichen mit der aktuellen Kraftstoffbevorratung von 180 m³ ergeben sich Faktoren von 4,5 (LOHC) bzw. 6,5 (Druckwasserstoff), um die das aktuelle Tankvolumen ansteigt. Wird der Wasserstoff zentral bereitgestellt, so muss circa alle 3,5 Stunden eine Anlieferung von Druckwasserstoff erfolgen (6,8 Trailer/d). Erfolgt der Transport via LOHC, so ist eine zweimalige Belieferung am Tag, also alle 12 Stunden, ausreichend. Im Vergleich dazu wird eine konventionelle Tankstelle aktuell nur alle zwei Tage mit Kraftstoff versorgt. Soll der Wasserstoff direkt an der Tankstelle bereitgestellt werden, so bezieht die Elektrolyse täglich 171 MWh_{el}. Läuft diese durchgehend für 24 h, ergibt sich eine mittlere Anschlussleistung der Tankstelle von 7,1 MW_{el}. Im Falle der reinen Nutzung erneuerbarer Energien sollte eher von dem Betrieb des Elektrolyseurs für 8 Stunden ausgegangen werden. In diesem Fall müsste die Tankstelle mit einer Leistung von 21,3 MW_{el} angebunden werden.

Diese Zahlen werfen eine Reihe von Bedenken auf. Zum einen sollte hinterfragt werden, ob die Lagerung von 46 Tonnen elementarem Wasserstoffs an jeder Tankstelle sicherheitstechnisch hinnehmbar ist. Darüber hinaus müsste für jede Tankstelle – unabhängig davon ob eine zentrale oder dezentrale Bereitstellung angedacht ist – ein Elektrolyseur mit einer Leistung von 5 MW_{H₂} zur Verfügung stehen. Wird der Wasserstoff zentral erzeugt, so kommt es durch die geringen Transportkapazitäten eines Druckwasserstoff-Trailers zu einem immensen Liefer- und Logistikaufkommen. Bei einer Installation des Elektrolyseurs an der Tankstelle entfällt zwar dieses Transportaufkommen, jedoch ist eine Anbindung jeder Tankstelle an Hochspannungsleitungen 110 kV unabdingbar.

Die Nutzung einer LOHC-basierten Wasserstoffinfrastruktur ändert am Kern obiger Problemstellungen nichts. Grund hierfür ist der sehr hohe Energiebedarf des straßengebundenen Verkehrs. Im Vergleich zu Druckwasserstoff weist das LOHC-Konzept jedoch in Punkto Sicherheit, dem Kraftstoffhandling und dessen Transport bzw. der Versorgungsstruktur entscheidende Vorteile auf. Hinzu kommt, dass insbesondere durch die Nutzung existierender Infrastrukturen ein sukzessiver Übergang zu erneuerbaren Kraftstoffen sowohl technisch als auch wirtschaftlich mit geringem Aufwand realisierbar ist, auch wenn zu Beginn der Umstellung noch grauer Wasserstoff mitgenutzt wird.

7 Wo wir stehen & was muss getan werden

Es stellt sich die Frage, was der aktuelle Stand der LOHC-basierten Antriebseinheit und LOHC-Infrastruktur ist, welche Aufgaben zeitnah gelöst werden können und welche Szenarien für einen LOHC-LKW Prototypen denkbar sind. Dabei ist eine ganzheitliche Betrachtung notwendig. Neben technischen Aspekten sind zwingend auch die gesetzlichen Rahmenbedingungen zu betrachten, die für die reibungslose Einführung von LOHC als Kraftstoff bereits in diesem Stadium berücksichtigt werden müssen. „*Wo wir stehen*“ soll den Status-quo beleuchten und daraus den jeweiligen Handlungsbedarf ableiten. Unter dem Motto „*Was getan werden muss*“ sind Arbeitspakete formuliert, die für den Aufbau eines Prototyps und die Installation einer LOHC-Infrastruktur in einer Pilotregion anzuwenden sind.

7.1 Fahrzeugseitige Komponenten

LOHC- Konzept mit Wasserstoffverbrennungsmotor

Wo wir stehen

Die forcierte Entwicklung von Wasserstoffverbrennungsmotoren liegt bereits einige Jahre zurück. Sowohl die Firma BMW im Bereich von Limousinen als auch MAN im Sektor des öffentlichen Nahverkehrs haben diese Thematik bis vor circa 10 Jahren intensiv als emissionsfreie Option des Antriebs diskutiert. Dabei sind unter anderem mehrere Gelenkbusse am Flughafen in München als auch im Linienbetrieb in Berlin im Einsatz (gewesen). Die Motoren wurden stöchiometrisch mit einer Saugrohr-Einblasung betrieben. Der Wasserstoff wurde als Druckwasserstoff bei einem Druck von 350 bar gespeichert. Weiterführende Entwicklungen wurden jedoch eingestellt. Das Interesse an dieser Technologie ist in den letzten Jahren jedoch wieder gewachsen. Die Firma Keyou GmbH aus München hat die Experten von BMW und MAN vereint und sich als Ziel gesetzt, bestehende Motoren für den Betrieb mit Wasserstoff umzurüsten. Kernaspekt ist hierbei die Umstellung auf Magerbetrieb sowie die Nutzung der inneren Gemischbildung. Mit dieser Direkteinspritzung können höhere Verdichtungsverhältnisse und damit bessere Wirkungsgrade erzielt werden. Darüber hinaus sinkt der spezifische Wasserstoffverbrauch deutlich ab. Die Keyou GmbH hat in diesem Jahr den Testbetrieb eines modifizierten Dieselmotors aufgenommen (DEUTZ TCD 7.8, 160-250 kW [87]).

Was getan werden muss

Kernaufgabe ist die Entwicklung eines aufgeladenen Motors mit Direkteinspritzung in der für den Schwerlastverkehr geforderten Leistungsklasse. Basis dieser Arbeiten ist die Entwicklung des Injektors. Darüber hinaus spielt das Wärmemanagement des Motors für das Zusammenspiel mit dem LOHC System eine wichtige Rolle. Es gilt, eine Optimierung des Systems Wasserstoffverbrennungsmotor-Freisetzungseinheit durchzuführen. Eine Steigerung der Abgastemperatur des Motors senkt zwar dessen Effizienz, ermöglicht aber einen höheren Deckungsgrad des Wärmebedarfs der Freisetzungseinheit. Dieses Optimierungsproblem ist sowohl technisch als auch unter dem Gesichtspunkt der Lebensdauer des Motors zu diskutieren. Der neue Motor und die Freisetzungseinheit sollen in einem LKW-Prototypen verbaut werden, der im Jahr 2020 fahren könnte.

Um das LOHC im dynamischen und mobilen Betrieb früher zu testen, kann einer der existierenden Wasserstoffverbrennungsmotor-Busse auf das LOHC System umgerüstet werden. Dabei könnten die Druckwassertanks durch LOHC-Tanks ersetzt werden und der Wasserstoff zur Versorgung des Verbrennungsmotors aus dem LOHC freigesetzt werden. Ein solcher Bus ist bereits in der chinesischen Stadt Wuhan als Kooperation zwischen Prof.Cheng und der Firma JAC heute fahrbereit.

Wesentliches Arbeitspaket sollte die Untersuchung und Konzeptionierung des H₂-Puffers sein. Dieser ist für die Abbildung der Dynamik notwendig. Das Druckniveau hat Auswirkungen auf den Injektionsdruck des Motors, das Volumen des Pufferspeichers und die notwendige Kompressionsenergie.

H₂-DeNO_x

Wo wir stehen

Die Entwicklung der H₂-SCR ist für ein LOHC-basiertes Antriebskonzept mit Verbrennungsmotor essentiell, um hinsichtlich der zu erwartenden Emissionen mit der alternativen Brennstoffzelle gleich auf zu sein. Darüber hinaus sei aber betont, dass die H₂-SCR in Verbindung mit LOHC als sicherem und Infrastruktur-kompatiblen, on-board Wasserstoffspeicher auch für heutige konventionelle Dieselantriebe eine attraktive Option darstellt. Die Herausforderung ist die Entwicklung eines Katalysators, der einen hohen Umsatz von NO_x zu N₂ ermöglicht, ohne den Sauerstoff im Abgas anzutasten. Dabei ist insbesondere auf die Selektivität zur Bildung von N₂ zu achten, um die Bildung des Treibhausgases N₂O als Nebenprodukt des H₂-SCR zu vermeiden.

Vielversprechende Ergebnisse wurden von der Technischen Universität Bergakademie Freiberg (Prof. Kureti) mit Platin (Pt) oder Palladium (Pd) auf einem Wolfram-Zirkoniumoxid-Träger (WO₃/ZrO₂) erzielt. Die durchgeführten detaillierten Charakterisierungen umfassen die Identifizierung eines optimalen Anteils von Wolframoxid im Träger, die Untersuchung des Umsatzes sowie der Selektivität bei unterschiedlichen Abgasbedingungen (Temperatur, O₂-Konzentration) und die Beschichtung einer Cordierit-Wabenstruktur (konventioneller Katalysatorträger). Dabei konnten hohe Aktivitäten bis zu Temperaturen von 250 °C bei gleichzeitig geringen N₂O Bildungsraten beobachtet werden. In Alterungstests konnte darüber hinaus die Stabilität der Materialien in feuchten Gasströmen nachgewiesen werden.

Allgemein kann gesagt werden, dass mit Pt/WO₃/ZrO₂ und Pd/WO₃/ZrO₂ zwei vielversprechende Katalysatoren identifiziert und charakterisiert wurden. Dabei gilt es, die etwas schnellere Kinetik der Pt-basierten Katalysatoren gegenüber der etwas vorteilhaften Selektivität der Pd-Katalysatoren abzuwägen. Für den Einsatz im LKW kann angenommen werden, dass die Baugröße einer DeNO_x mit aktuell eingesetzten Dieseloxydationskatalysatoren vergleichbar ist. Aufgrund der schnellen Kinetik ist unter Umständen sogar eine kleinere Dimensionierung denkbar.

Mit den aktuell verfügbaren Katalysatoren ist eine Abgasreinigung eines Wasserstoffverbrennungsmotors (350 kW, saubere Verbrennung, NO_x-Rohemissionen < 50 ppm) mit H₂-Anteilen von 2.000 ppm nach dem Motor bis unter die Nachweisgrenze möglich. Bei einem 350 kW Motor und einem Abgasstrom von 236 m³/h in Teillast entspricht dies circa 39 g_{H₂}/h. Unter Volllast (1700 UpM, 2050 Nm) ergibt sich für den Abgasstrom von 1260 m³/h ein notwendiger Wasserstoffstrom von 210 g_{H₂}/h. Soll dieser Wasserstoff aus LOHC⁺ zur

Verfügung gestellt werden, sind LOHC-Ströme von $0,7 L_{\text{LOHC+}}/\text{h}$ bzw. $4,1 L_{\text{LOHC+}}/\text{h}$ dem Freisetzer zuzuführen. Verglichen mit dem LOHC-Bedarf für den Antrieb des LKWs sind diese Werte verschwindend gering (vgl. Kapitel 5.2).

Was getan werden muss

Im Rahmen der Katalysatorentwicklung ist eine weitere Optimierung der Performance anzustreben. Insbesondere die Problematik der Bildung von N_2O sollte im Vordergrund stehen. Darüber hinaus ist die Langzeitstabilität unter harschen Bedingungen zu betrachten. In diesem Kontext muss auch der Einfluss potenzieller Verunreinigungen des Wasserstoffs aus dem LOHC-System, sowie die daraus bei der Verbrennung entstehenden Produkte auf die Reaktivität des Katalysators untersucht werden. Darüber sollten die Grenzen der Umsetzbarkeit des Betriebs der H_2 -SCR mit dem Wasserstoffschlupf aus dem Motor analysiert werden.

LOHC-Konzept mit Brennstoffzelle

Wo wir stehen

Der Einsatz von Brennstoffzellen wird seit vielen Jahren für den PKW-Sektor aber auch für Nutzfahrzeuge diskutiert. Dabei liegt der Fokus vermehrt auf dem regionalen Verteilerverkehr und dem öffentlichen Personennahverkehr. Brennstoffzellen mit Leistungen bis $198 \text{ kW}_{\text{el}}$ sind kommerziell verfügbar [88]. Dabei wird eine Leistungsdichte von circa $0,17 \text{ kW}_{\text{el}}/\text{L}$ bzw. $0,28 \text{ kW}_{\text{el}}/\text{kg}$ ausgewiesen. Durch den modularen Aufbau sind höhere Leistungen ohne größere Probleme umsetzbar. In Verbindung mit dem LOHC System sind bereits einige Untersuchungen hinsichtlich der Schädigung der Brennstoffzelle durch Verunreinigungen im Wasserstoffstrom durchgeführt worden. Diese zeigen, dass die aus LOHC im Regelbetrieb freigesetzte Wasserstoffqualität ohne Probleme in Brennstoffzellen verstromt werden kann. Die Kopplung der Freisetzungseinheit und Brennstoffzelle mit einer Batterie wird als unkritisch betrachtet. Das Zusammenspiel von Brennstoffzelle und Leistungsbatterie ist erprobt und stellt die Basis vieler H_2 -basierten Hybridfahrzeuge dar.

Was getan werden muss

In Kombination mit dem LOHC-Konzept sind Belastungstests der Brennstoffzelle mit möglichen Verunreinigungen im Wasserstoffstrom durchzuführen wie sie bei Spitzenlasten (hohe Temperatur, geringer H_2 -Druck) vermehrt auftreten können. Kernfrage ist, welche Lebensdauer für das System aus Freisetzungseinheit und Brennstoffzelle zu erwarten ist.

Perspektivisch ist sicherlich auch die Option einer Hochtemperatur SOFC im Mobilitätsbereich in die Betrachtung einzubeziehen. Hierbei müssen Untersuchungen hinsichtlich des Einflusses der Vibrationen und Temperaturschwankungen auf die Lebensdauer durchgeführt werden.

Freisetzungseinheit

Wo wir stehen

Die entscheidende Komponente eines LOHC-basierten Antriebsstrangs ist die Freisetzungseinheit. Im Kontext der Leistungsdichte spielt die Reaktorbauweise, das Katalysatormaterial sowie die Kompaktheit der Peripherie (Wasserstoffreinigung, Wärmeübertrager, Pumpen) die wesentliche Rolle.

Kommerzielle Freisetzungseinheiten

In einem kommerziellen Projekt ist die erste technische Referenzanlage zur LOHC Dehydrierung in kommerziellem Maßstab entwickelt, geplant und im Januar 2016 in Betrieb genommen worden. Diese Anlage ist in der Lage, bis zu 3 kg/h Wasserstoff aus LOHC freizusetzen. Wichtig ist, zu keinem Zeitpunkt der Entwicklungsphase wurde eine Optimierung der Leistungsdichte der Anlage durchgeführt. Sie dient zur stationären Bereitstellung von Strom in einem Mikro-Smartgrid und nicht für den mobilen Einsatz. Die Anlage ist mit einer PEM-Brennstoffzelle gekoppelt, um den freigesetzten Wasserstoff in elektrischen Strom umzuwandeln. Die Wärmeversorgung der endothermen Dehydrierung erfolgt über eine Wasserstoff-befeuerte Thermalölanlage. Somit ist ein eigenversorger Inselbetrieb möglich. Installiert ist die Gesamtanlage in einem 20-Fuß und einem 10-Fuß Seecontainer, um eine robuste und sichere Aufstellung zu ermöglichen. Die eigens entwickelte Automatisierung ermöglicht einen ferngesteuerten Betrieb, eigenständiges An- und Abfahren und definierte Lastwechsel. Mit dieser Referenz ist eine hervorragende, funktionale Ausgangsbasis zur Entwicklung des Produkts einer kommerziellen Dehydriertechnologie geschaffen.

In der Pilotanlage beträgt das Gesamtvolumen des LOHC-Strangs und der Wasserstoffaufreinigung bis zur Schnittstelle der Brennstoffzelle ca. 1400 L. Die freigesetzte Leistung der Brennstoffzelle erreicht im Dauerbetrieb bis zu 25 kW_{el}. Daraus ergibt sich eine Leistungsdichte der Anlage (ohne Volumen der Brennstoffzelle) von circa 18 kW_{el}/m³. Die Thermalölanlage und die Kühlaggregate sind hierbei noch nicht betrachtet. Die Leistungsdichte des Reaktors ergibt sich bei 3 kg/h Wasserstoff und einem Reaktorvolumen von 250 L zu circa 400 kW_{H₂}/m³.



Abbildung 22: Pilotanlage zur Freisetzung von Wasserstoff aus LOHC (Hydrogenious ReleaseBOX)

Reaktorbauweise

Bei der Konzeptionierung des Reaktors muss auf eine möglichst große Katalysatoroberfläche, eine ungehinderte Gasabscheidung sowie einen unlimitierten Wärmeeintrag geachtet werden. Vertikale und horizontale Rohrbündelreaktoren können als Stand der Technik bezeichnet werden. Insbesondere die vertikale Bauweise bietet die Möglichkeit auch in mobilen Einheiten zum Einsatz zu kommen.

Reaktionsbedingungen und Katalysator

Das notwendige Reaktionsvolumen ist abhängig von der gewünschten Freisetzungsrate (Wasserstoffleistung), den Betriebsbedingungen sowie der aktiven Katalysatoroberfläche. Stand der Technik ist ein Platin/Aluminiumoxid Katalysator mit einem Platinanteil von 0,3 % (kommerzieller Katalysator). Gängige Reaktionsbedingungen sind Drücke von 2 bar und Temperaturen von 310 °C. Diese Temperatur ist so gewählt, dass die Kinetik ausreichend schnell und gleichzeitig der Anteil an Kohlenwasserstoffen im Wasserstoffstrom gering ist.

Leistungsdichte

Die Leistungsdichte wird sowohl von dem reinen Reaktionsvolumen als auch von der Peripherie geprägt. Während das Reaktionsvolumen direkt von der gewünschten Freisetzungsrate und dem Katalysator abhängig ist, ist das Bauvolumen der Peripherie durch die Größe der Komponenten und dem Packaging geprägt. Aktuell kann davon ausgegangen werden, dass das gesamte Volumen der Freisetzungseinheit circa dem Faktor 2 bis 3 des Reaktionsvolumens beträgt. Hinsichtlich des Gewichtes wird aktuell von der konservativen Annahme $1 \text{ kg}_{\text{Freisetzer}}/L_{\text{Freisetzer}}$ ausgegangen.

Die Kinetikdaten des oben beschriebenen (kommerziellen) Katalysators können in einer Art Kennlinienfeld dargestellt werden. **Abbildung 23** zeigt die Charakteristik des Pt/Al₂O₃ Katalysators (0,3 Gew.-% Pt) in Abhängigkeit der Reaktionstemperatur und des gewünschten Umsatzes der Dehydrierung. Durch Vorgabe dieser beiden Parameter lässt sich das spezifische Reaktionsvolumen ($L_{\text{Reaktor}}/kW_{\text{H}_2}$) und der spezifische LOHC-Volumenstrom ($L_{\text{LOHC}}/(h \text{ kW}_{\text{H}_2})$) ablesen. Bei der gängigen Reaktionstemperatur von 310 °C und einem gewünschten Reaktionsumsatz von 90 % ergibt sich ein spezifisches Reaktionsvolumen von circa $0,75 L_{\text{Reaktor}}/kW_{\text{H}_2}$ und ein benötigter spezifischer Volumenstrom von LOHC mit $0,74 L_{\text{LOHC}}/(h \text{ kW}_{\text{H}_2})$ (bei $T = 310 \text{ °C}$). Es ist deutlich zu erkennen, dass die Kinetik immens von der Reaktionstemperatur abhängig ist. Eine Erhöhung der Temperatur auf 320 °C ermöglicht ein spezifisches Reaktionsvolumen von $0,5 L_{\text{Reaktor}}/kW_{\text{H}_2}$, während eine Senkung der Temperatur auf 300 °C bereits $1,0 L_{\text{Reaktor}}/kW_{\text{H}_2}$ in Anspruch nimmt. Gleichzeitig wird damit auch deutlich, dass die Leistungsregelung über die Temperatur möglich ist. Jedoch ist zu berücksichtigen, dass die thermische Trägheit des Systems nur langsame Laständerungen zulässt.

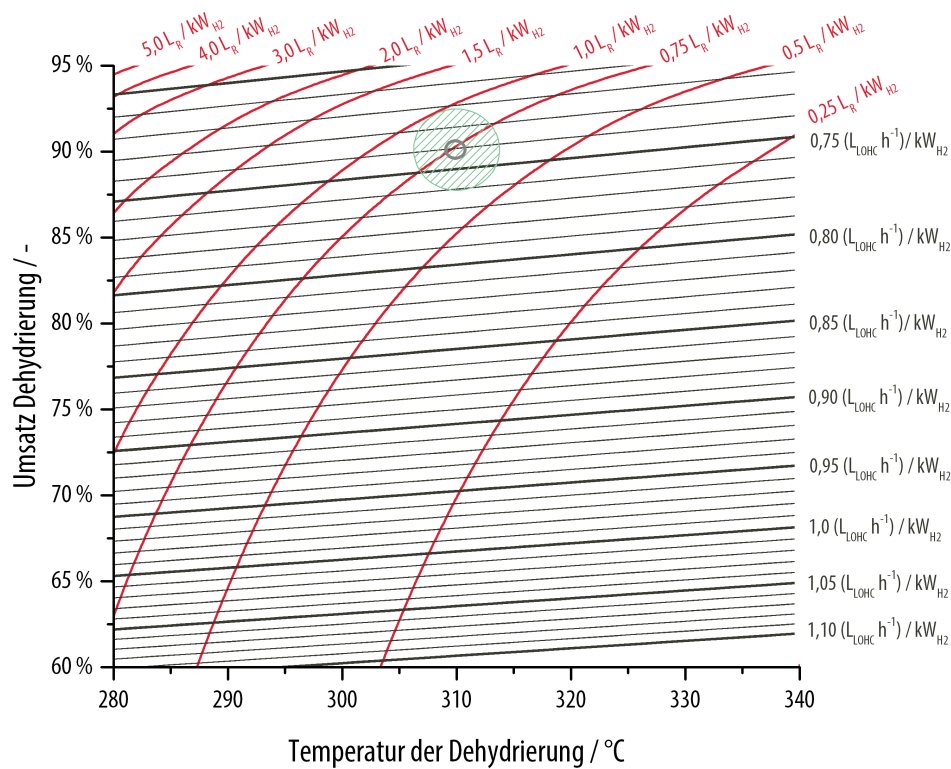


Abbildung 23: Kennlinie zur Auslegung der Freisetzungseinheit (Annahme: Hydriergrad LOHC⁺ = 100%)

Dynamik

Allgemein kann gesagt werden, dass die Dynamik der Freisetzungseinheit stark von der Reaktorbauweise abhängig ist. Grundlegende Aspekte des dynamischen Verhaltens wurden an einem horizontalen Rohrbündelreaktor mit einer Leistung von 10 kW_{H₂} untersucht. Dabei konnte gezeigt werden, dass massive Reaktorkonstruktionen für eine thermische Trägheit des Systems sorgen und die Leistungsregelung über die Reaktionstemperatur langsam ist. Eine Steigerung des Volumenstroms geht mit einer Reduzierung des Reaktionsumsatzes und damit der Effizienz des Systems einher. Eine sehr direkte Methode für den Vollzug eines Lastwechsels ist die Änderung des Systemdrucks sowie die Nutzung des freien Volumens der Anlage. So konnte gezeigt werden, dass eine Leistungszunahme von 16 % allein durch die Druckänderung eines 19 L Ausgleichsbehälters realisierbar ist [89].

Was getan werden muss

Hinsichtlich der Leistungsdichte gibt es ein großes Optimierungspotenzial. Dies liegt insbesondere daran, dass bei bisherigen Anlagen die Optimierung der Leistungsdichte bezüglich Volumen und Gewicht nicht im Fokus der Entwicklungen lag. Sowohl eine Verringerung des spezifischen Reaktionsvolumens als auch eine Miniaturisierung der Peripherie kann zweifelsohne erzielt werden.

Die bisherige Katalysatorentwicklung hatte das Ziel, eine hohe Freisetzungsrates bei einer geringen Zersetzung des LOHCs zu ermöglichen. Dabei wurde als Richtwert eine maximale Zersetzung von 1 % nach 20 Zyklen festgelegt. Da dieses Kriterium erfüllt ist, kann in der nächsten Phase der Katalysatorentwicklung die Steigerung des Platinanteils angegangen werden. Mit diesem Schritt wird die Anzahl der aktiven Katalysatorzentren erhöht. Damit sind eine schnellere Reaktionskinetik und entweder geringere Reaktionsvolumina oder geringere Reaktionstemperaturen denkbar. Aktuell liegt der Platinanteil bei bis zu 0,5 Ma.-% des Katalysators. Aus technischer Sicht ist eine Steigerung auf bis zu 10 Ma.-% denkbar. Ziel dieser Entwicklung muss es sein, die Wasserstofffreisetzungsrates bezogen auf das eingesetzte Platin konstant zu halten. Dies ist nur dann möglich, wenn der Wärmeeintrag zum Katalysator parallel zur Steigerung des Platinanteils verbessert wird. Darüber hinaus ist es durch die Katalysatorforschung möglich, die platinbezogene Effizienz um einen Faktor 5 bis 10 zu erhöhen [83]. Allein durch die Optimierung des Katalysators kann von einer Reduzierung des Reaktionsvolumens von 50 % bis 70 % ausgegangen werden. Durch Packaging und intelligente Verschaltung der Peripherie wird für das Gesamtvolumen der Freisetzungseinheit ein Faktor von 1,5 des Reaktionsvolumens angenommen (aktuell: Faktor 2-3).

Für den Einsatz in einer mobilen Einheit ist das vertikale Rohbündelreaktorkonzept hinsichtlich der Robustheit gegenüber Anfahr- und Bremsvorgängen sowie Vibrationen zu untersuchen. In diesem Kontext kann auch über den Einsatz eines Plattenreaktors nachgedacht werden. Fokus bei allen Reaktorentwicklungen sollte auch auf der Reaktormasse liegen. Durch eine Leichtbauweise kann zum einen das Gewicht der Freisetzungseinheit reduziert und zum anderen die Kaltstartfähigkeit sowie die Dynamik optimiert werden.

Perspektivisch kann auch ein Membranreaktor zum Einsatz kommen. Erste Untersuchungen für die Eignung dieser Reaktorbauweise wurden bereits am Institut für Mikroverfahrenstechnik (Karlsruher Institut für Technologie, Prof. R. Dittmeyer) durchgeführt. Vorteil dieses Ansatzes ist, dass Wasserstoff stetig aus dem Reaktionsvolumen abgeführt wird und die Freisetzung theoretisch bei höheren Drücken ablaufen kann. Damit wäre die direkte Versorgung eines Wasserstoffverbrennungsmotors denkbar.

Kraftstofftank

Wo wir stehen

Herausforderungen für den fahrzeugseitigen Kraftstofftank sind die Aufnahme großer Mengen von Flüssigkeit und die Trennung von LOHC⁻ und LOHC⁺. Mehrkammertanks oder auch Kaskadentanks können hierbei als Stand der Technik bezeichnet werden. Zwar gibt es auch im Bereich der Diaphragma- und Blasantanks (bladder) einige kommerzielle Systemlösungen, allerdings sind diese nicht für mobile Einheiten konzipiert.

Was getan werden muss

Aufbauend auf den fahrzeugseitigen Gegebenheiten ist ein Konzept zu entwickeln, das den vorhandenen Bauraum des Fahrzeugs möglichst effizient ausnutzt. Dabei ist zu bedenken, dass im Falle eines Blasantanks keine vollständig freie Wahl der Tankgeometrie möglich ist. Es ist zu klären, ob die Vorteile eines derartigen Tanks gegenüber einem Kaskadentank aufrechterhalten werden können. Darüber hinaus muss berücksichtigt werden, dass das maximal zulässige Tankvolumen in diesem Bericht mit 1.500 L angenommen wurde. Ob diese Norm auch auf den Energieträger LOHC zutrifft, ist zum aktuellen Zeitpunkt noch nicht geklärt (vgl. auch Kapitel 7.3).

7.2 Infrastruktur

Erneuerbare Energien & Hydriereinheit

Wo wir stehen

Wesentliches Entscheidungskriterium für die Wahl der Pilotregion, in der eine LOHC-Infrastruktur aufgebaut und betrieben werden soll, ist die Verfügbarkeit von erneuerbaren Energien und eines Elektrolyseurs. Der Neubau dieser Komponenten zum alleinigen Zweck der Versorgung der LOHC-Infrastruktur erscheint aus Kostengründen nicht zweckmäßig. Grundsätzlich stellen bestehende Power-to-Gas Anlagen eine ideale Basis dar. Die einzige Komponente, um die das System erweitert werden müsste, wäre die Hydriereinheit. Diese Einheiten sind in mehreren Leistungsklassen kommerziell erhältlich (s.u.). Aufgrund der meist abgeschiedenen Lage existierender Wind- und Solarparks sollte der Platzbedarf des Hydrierers in Form eines 20 Fuß-Seecontainers sowie der wiederkehrende An- und Abtransport von LOHC kein Problem darstellen.

Was getan werden muss

Wesentliche Schritte sind in diesem Zusammenhang die Kontaktaufnahme zu den Betreibern existierender Wind- und Solarparks, die einen Elektrolyseur als Systemkomponente integriert haben. Durch eine Eruiierung der vorliegenden Anlagencharakteristik kann mit dem Betreiber ein Konzept für den Betrieb der Hydriereinheit und die Lagerung von LOHC⁻ sowie LOHC⁺ erarbeitet werden. Essentiell ist hierbei, vorab eine Bilanzierung des LOHC-Bedarfs sowie die weitere Versorgungsstruktur zu analysieren. Lokale Gegebenheiten sowie die Einbeziehung der Bürger und ansässigen Unternehmen sollen bereits in der Planungsphase berücksichtigt werden.

LOHC Hydriereinheit

Wo wir stehen

Die erste LOHC Hydrieranlage (siehe **Abbildung 24**) im kommerziellen Maßstab mit 30 kW Leistung wurde von Hydrogenious Technologies in Betrieb genommen und ist an eine 98 kWp Photovoltaikanlage und eine 50 kW PEM Elektrolyse (Siemens SILYZER) gekoppelt. Regenerativer Wasserstoff wird in einer kontinuierlichen Hydrierung in LOHC gespeichert und kann anschließend in herkömmlicher Kraftstoffinfrastruktur transportiert werden. Die LOHC Hydrieranlage wurde in einem 20-Fuß Seecontainer aufgebaut und ist seit Mai 2015 in dauerhaftem Betrieb mit täglichen Lastzyklen. Dabei wird die Überschusswärme der Elektrolyse und Hydrierung genutzt und in das lokale Heizsystem des Hauses integriert.

Was getan werden muss

Basierend auf dem Systemdesign der ersten Labor- und Pilotanlagen kommerzialisiert Hydrogenious Technologies LOHC Wasserstoff-Speicheranlagen in Leistungsgrößen zwischen 30 und 300 kW und entwickelt in Partnerschaft mit MAN Diesel&Turbo LOHC Hydriersysteme im Multi-Megawatt Maßstab.



Abbildung 24: Pilotanlage zur Speicherung von Wasserstoff in LOHC (Hydrogenious StorageBOX)

Lagerung und Transport von LOHC

Wo wir stehen

Nach aktuellem Stand des Wissens ist eine bedingungslose Lagerung von LOHC⁺ und LOHC⁻ in konventionellen Stahl tanks möglich. Weder an die Geometrie noch an die Art des Stahls werden Anforderungen gestellt. Es wird davon ausgegangen, dass das LOHC somit an der Tankstelle in den existierenden Mehrkammertanks gelagert werden kann. Dahingegen gibt es keine Untersuchungen zur Verträglichkeit mit Aluminium, was insbesondere beim Kraftstofftransport wichtig ist. Hinsichtlich der Verträglichkeit mit Kunststoffen gibt es teils positive und teils negative Erfahrungen. Sowohl LOHC⁺ (Perhydro-Dibenzyltoluol) als auch LOHC⁻ (Dibenzyltoluol) sind REACH registriert und nach ADR, ADN, RID und IATA nicht als Gefahrgut klassifiziert.

Die Lagerung von LOHC bei tiefen Temperaturen wird als unkritisch bewertet. Mit einem Stockpunkt $<-32\text{ °C}$ kann die Notwendigkeit einer Heizung der unterirdischen Lagertanks ausgeschlossen werden. Lediglich die weiter zunehmende Viskosität sollte hierbei berücksichtigt werden.

Was getan werden muss

Bei konventionellen Tanklastwagen ist der Kraftstofftank gewichtsgeschuldet aus Aluminium gefertigt. Für den Transport von LOHC sollte demnach zunächst die Verträglichkeit mit Aluminium geprüft werden. Darüber hinaus ist zu untersuchen, ob die bei der Lagerung und dem Transport von konventionellen Kraftstoffen eingesetzten Leitungen, Dichtungen, Pumpen und Ventile auch für den Einsatz von LOHC genutzt werden können. Insbesondere die hohe Viskosität sollte hier im Vordergrund stehen. In diesem Kontext sollte auch – falls gewünscht – die Möglichkeit der gravimetrischen Förderung bei der Entladung eines Tanklastzugs betrachtet werden. In Langzeitstudien ist zudem die Stabilität hinsichtlich der Zersetzung unter Lufteinfluss und Korrosion zu betrachten. Auf Basis der Ergebnisse kann eine Anforderungsliste an alle Komponenten einer Kraftstoffinfrastruktur erstellt werden.

Zapfsäule und Zapfpistole

Wo wir stehen

Die Betankung des Fahrzeugs mit LOHC⁺ sollte zeitlich mit der Entladung des wasserstoffarmen LOHC erfolgen. Zum aktuellen Zeitpunkt existiert kein Konzept zur gegenläufigen Förderung von Flüssigkeiten an Tankstellen. Lediglich eine Gasrückführung zur Absaugung gasförmigen Komponenten ist Stand der Technik. Allerdings wurde der Begriff einer *zweiflutigen Zapfpistole* bereits 2012 in einer Veröffentlichung im Kontext der LOHC-Technologie aufgegriffen [69]. Hinsichtlich der Förderung des LOHCs aus dem Tank über die Zapfsäule und –pistole spielt die hohe Viskosität (insbesondere von LOHC⁺) eine wichtige Rolle. Aufgrund der Tatsache, dass aktuelle (konventionelle) Zapfsäulen bereits mit Zahnradpumpen ausgestattet sind, wird dies jedoch als unkritisch bewertet.

Auch die Hydriergradbestimmung ist dem System aus Zapfsäule bzw. Zapfpistole zuzuordnen. Es besteht eine sehr gute Korrelation zwischen dem Hydriergrad und der Dichte des LOHCs. Hohe Wasserstoffbeladungen resultieren in einer Reduzierung des spezifischen Gewichtes von 1,04 kg/L (LOHC⁻) auf 0,921 kg/L (LOHC⁺) (Werte bei 20 °C). Auch wenn diese Dichteunterschiede nicht gravierend sind, so korreliert der jeweilige Wert äußerst direkt mit dem Brechungsindex. Basierend auf diesen Ergebnissen wurde bereits eine online Hydriergradbestimmung mit einem Refraktometer im Labor demonstriert. Ob diese Hydriergradbestimmung an jeder Zapfsäule oder einmalig an der Tankstelle erfolgt, ist somit eher eine Frage der gesetzlichen Vorschriften (vgl. Kapitel 7.3) als eine technische Herausforderung.

Was getan werden muss

Analog zur LOHC Speicherung und dem Transport muss auch die Verträglichkeit der aktuell in der Zapfsäule eingesetzten Komponenten geprüft werden. Dabei sind vorwiegend die Dichtungen und Schläuche zu betrachten. Hinsichtlich der Pumpen muss die maximale Förderate ermittelt werden, die für die Benutzerfreundlichkeit und Tankzeit essentiell ist. In diesem Kontext sollte auch die Genauigkeit der Messung des Volumenstroms betrachtet werden. Es stellt sich die Frage, ob die aktuelle Vorschrift von 0,5 Vol.-% auch bei einer hohen Viskosität eingehalten werden kann.

Wesentlicher Aspekt ist jedoch die Entwicklung einer zweiflutigen Zapfpistole und des zugehörigen Einfüllstutzens. Dabei kann die Förderung von LOHC⁻ aus dem fahrzeugseitigen Kraftstofftank durch einen Ansaugvorgang oder durch ein Verpressen von LOHC⁺ und der damit verbundenen Verdrängung des LOHC⁻ erfolgen. Essentiell ist die Zusammenarbeit zwischen der fahrzeugseitigen Entwicklung des Einfüllstutzens und der Zapfpistole. Aufgrund der gegenläufigen LOHC-Förderung unter Druck ist eine geschlossene (dichte) Verbindung zwischen der Zapfpistole und dem LOHC-Tankstutzen des Fahrzeugs zu entwickeln. Dabei sollte darauf geachtet werden, dass die Benutzerfreundlichkeit und Einfachheit des Systems gewährleistet wird.

Hinsichtlich der Hydriergradbestimmung sind Konzepte zur Integrierung dieser Messung an der Tankstelle oder Zapfsäule zu entwickeln. Dabei ist zu berücksichtigen, dass es aufgrund gesetzlicher Rahmenbedingungen notwendig sein könnte, sowohl das von der Tankstelle verkaufte LOHC⁺ zu charakterisieren als auch das vom Verbraucher zurückgegebene LOHC⁻ zu Abrechnungszwecken zu vermessen. Grundlegend ist zu prüfen, mit welcher Genauigkeit die Messung des Hydriergrades bei unterschiedlichen Temperaturen erfolgen kann. Eng damit verbunden ist die Art der Abrechnung des LOHCs bzw. des darin gebundenen Wasserstoffs. Technisch steht dazu eine Vielzahl an Möglichkeiten zu Verfügung. Herausforderung wird es eher sein, eine zweckmäßige gesetzliche Regelung zu definieren (vgl. Kapitel 7.3).

7.3 Gesetzliche Regelungen

Fahrzeugseitige Fragestellungen

Wo wir stehen

Aktuelle gesetzliche Regelungen für die Zulassung von Fahrzeugen sowie die eingesetzten Kraftstoffe sind nur bedingt auf den LOHC-basierten Ansatz zu übertragen. Es stellt sich die Frage, ob aktuelle Vorschriften dennoch berücksichtigt werden müssen oder ob Änderungen aufgrund der abweichenden Technologie zulässig sind. Damit kann der Gesetzgeber schließlich die Rahmenbedingungen dieser Technologie bestimmen.

Was getan werden muss

Eine der zentralen und elementaren Fragestellungen ist die Menge an Kraftstoff, die ein LKW mitführend darf. Laut ADR [21] wird hier ein maximales Tankvolumen von 1.500 L vorgeschrieben. Dabei fehlt die Differenzierung zwischen einem Kraftstoff und dem im Falle von LOHC vorliegenden Energie tragenden Stoff. Der Kraftstoff im eigentlichen Sinne ist bei LOHC der Wasserstoff. Allerdings liegt er gebunden in der Flüssigkeit vor, die nur als Träger dient. Vergleichbar wäre diese mit einer Druckgasflasche, die keine weitere Funktion als das „Tragen“ des Gases erfüllt. Es ist demnach zu klären, ob die vorgeschriebene maximale Tankgröße im Falle eines Trägerstoffs überschritten werden darf, wenn er kein Gefahrstoff ist. Ist dies nicht der Fall, so können mit Hilfe des LOHC-Konzeptes maximal 85,7 kg_{H₂} Wasserstoff getankt werden. Ein zweiter wichtiger Aspekt betrifft die fahrzeugseitige Zulassung eines LOHC-basierten Antriebsstrangs. Dies muss in die weiteren Entwicklungen einbezogen und idealerweise auch bei der Konzeptionierung eines Prototyps berücksichtigt werden. In diesem Kontext muss angemerkt werden, dass alle gesetzlichen und regulatorischen Auflagen auf internationaler bzw. europäischer Ebene definiert werden müssen.

Zapfsäule und Tankstelleninfrastruktur

Wo wir stehen

Kernaspekt der notwendigen gesetzlichen Regelungen im Bereich der Tankstelleninfrastruktur betrifft die Art der Abrechnung des LOHCs sowie die Einführung eines LOHC-Pfandsystems. Wie auch bei den fahrzeugseitigen Fragestellungen sind die aktuellen Normen und Vorschriften nicht auf das LOHC System übertragbar. Im Wesentlichen muss geklärt werden, welche Anforderungen an eine LOHC Zapfsäule und die zweiflutige Zapfpistole im Kontext der Zulassung gestellt werden. Im Konkreten ist die Frage zu beantworten, über welche Größe wird das bezogene und zurückgegebene LOHC abgerechnet. Bei aktuellen Kraftstoffen erfolgt die Preisbildung über das verkaufte (temperaturkorrigierte) Volumen. Im Falle des LOHCs kommt der Hydriergrad als weiterer Parameter hinzu.

Was getan werden muss

Die Mess- und Eichordnung gibt vor, dass kein Messverfahren an sich, sondern nur ein Messgerät eine Zulassung erhalten kann. Dabei spielt schließlich die Messgenauigkeit, Messbeständigkeit und Messsicherheit eine wichtige Rolle. Im Falle des Durchfluss-Refraktometers ist somit von Seiten des Herstellers darzulegen, welche Messgrößen notwendig sind (Volumenstrom, Druck, Temperatur usw.) um Korrelation zwischen den Eingangsgrößen und der Zielgröße (Abrechnungsgröße) zu bestimmen. Darüber hinaus sind vom Hersteller Konzepte vorzulegen, wie das Messgerät bei der Zulassung und schließlich im Betrieb geprüft werden kann. Erst wenn all diese Voraussetzungen getroffen sind, kann die Physikalisch- Technische Bundesanstalt erste Schritte zur Zulassung initiieren [90]. Parallel dazu ist mit den Herstellern von Zapfsäulen eine Diskussion über die tatsächliche (technische) Ausführung der Messung der Konzeptionierung der Zapfsäule zu führen.

Hinsichtlich des Pfandsystems ist zu berücksichtigen, dass der Hydriergrad des zurückgegebenen LOHC je nach Verbraucher stark variiert. Durch hohe Lastanforderungen oder auch ungünstige Betriebsbedingungen wird nur ein Teil des Wasserstoffs freigesetzt und an der Tankstelle eine gewisse Energiemenge in Form von noch nicht freigesetztem Wasserstoff im LOHC zurückgegeben. Es ist demzufolge ein Konzept zu erarbeiten, bei dem eine Wertstellung des nicht genutzten (freigesetzten) Wasserstoffs als Gutschrift erfolgt. Dazu muss insbesondere mit den Betreibern der Tankstelle und den Akteuren der Kraftstofflogistik in Kontakt getreten werden. Allgemein wäre die Abrechnung in Form der bezogenen oder zurückgegebenen Energiemenge, also in kWh, erstrebenswert. Damit wäre auch eine Transparenz zur Elektromobilität geschaffen.

Erneuerbare Energien & Hydriereinheit

Wo wir stehen

Nach aktuellem Stand sind die Betreiber von Elektrolyseuren nicht von der EEG-Umlage befreit. Dies stellt eine große Hürde für den Betrieb und die Planung einer Power-to-Gas Anlage dar [91]. Auch durch die Kombination mit einer Hydriereinheit wird sich daran kaum etwas ändern. Darüber hinaus stellt sich die Frage, ob eine Besteuerung von LOHC als Energieträger angedacht ist. Dies würde insbesondere den Vertrieb des LOHCs beeinflussen und ein Hindernis für die Spediteure darstellen.

Was getan werden muss

In diesem Kontext ist zu eruieren, ob spezielle Förderprogramme oder Subventionen für die Installation einer Hydriereinheit denkbar sind. Damit könnten für die Betreiber existierender Anlagen Anreize geschaffen werden, in den neuen Markt der LOHC-Infrastruktur einzutreten.

8 Abschließender Systemvergleich

Basierend auf dem aktuellen Stand der Technik der Komponenten kann ein Systemvergleich der LOHC-basierten Antriebsstränge mit dem konventionellen Dieselantrieb aber auch regenerativen Alternativen durchgeführt werden. Zu diesem Zweck wird eine fahrzyklenbasierte Simulation mit Dymola 2017 FD01 von Dassault Systèmes unter Verwendung der TIL Media-Stoffdatenbibliothek der TLK-Thermo GmbH erstellt.

Anhand des Fahrzeugmodells erfolgt die Berechnung der abgerufenen Antriebsleistungen basierend auf physikalischen Grundgleichungen, während die Effizienz der einzelnen Antriebskomponenten kennfeldbasiert einbezogen wird. Das Modell des Fahrzeugchassis errechnet aus Beschleunigung, Geschwindigkeit, Steigung und Fahrzeugmasse die Leistungsanforderung an den Antrieb durch Luftwiderstand, Beschleunigungskraft, Hangabtriebskraft und Reibungskraft. Die Leistungsanforderung wird über Hinterachs-, Getriebe- und Nebenaggregatmodell an das Modell des eigentlichen Motors weitergereicht, wobei sich die Leistungsanforderung durch diese vorgeschaltete Effizienzkette erhöht. Parallel erfolgt eine Berechnung der Antriebsdrehzahl über Raddurchmesser, Achsübersetzung und Getriebeübersetzung des aktuell eingelegten Gangs. Das Hoch- und Herunterschalten des Getriebes geschieht vollautomatisch durch die Nutzung von Schaltpolygonen nach VECTO [92]. Ein PID-Regler kann zudem über ein parallel geschaltetes Modell einen Bremsengriff vorgeben. Über ein Kennfeld wird die Bremsleistung hierbei derart begrenzt, dass ein realistisches Verzögerungsverhalten abgebildet wird.

Basis der Simulation stellt ein Sattelzug mit einem zulässigen Gesamtgewicht von 40 Tonnen dar. Details zu den getroffenen Annahmen für den Diesel- und Wasserstoffverbrennungsmotor, der Brennstoffzelle, dem LOHC System, der Batterie, dem Druckwasserstofftank sowie dem Flüssigkeitstank sind im Anhang zu finden (**Tabelle 8** bis **Tabelle 14**). Die Strecken- und Geschwindigkeitsvorgabe erfolgt durch den *ACEA Long Haul Cycle* des Europäischen Automobilherstellerverband ACEA [93] in der vorgeschlagenen Version vom 29. April 2015. Dieser Testzyklus ist nicht wie beispielsweise der in der PKW-Branche genutzte *Neue Europäischer Fahrzyklus (NEFZ)* zeitbasiert, sondern distanzbasiert und gibt über eine Strecke von rund 100 Kilometern die zu fahrende Geschwindigkeit sowie die zu bewältigenden Steigungen, Gefälle und Stopps vor. Er entspricht somit eher einer realitätsnahen Teststrecke, denn einer theoretischen Leistungsabfrage unabhängig von der maximalen Systemleistung. Durch die Steigungen von bis zu 6,6 % wird die Maximalleistung eines schweren Sattelzugs wiederholt abgerufen. **Abbildung 25** zeigt den definierten Fahrzyklus.

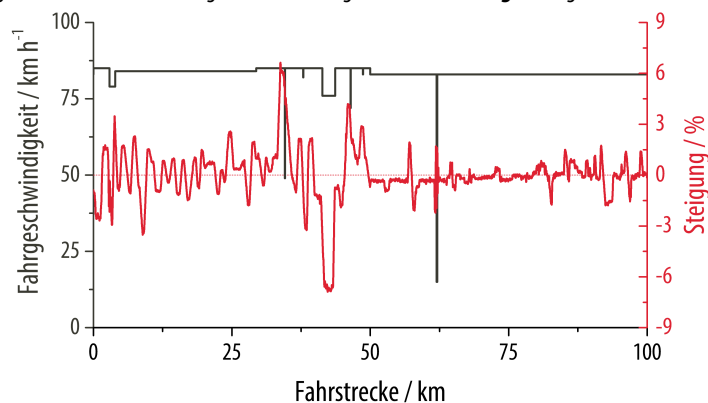


Abbildung 25: ACEA Long Haul Cycle [93]

Im Falle der LOHC-basierten Antriebskonzepte wird die Simulation zudem genutzt, um den realisierbaren Deckungsgrad des Wärmebedarfs für die Freisetzung zu ermitteln. Dabei werden mehrere Szenarien betrachtet. Im Falle der Brennstoffzelle wird als einzige praktikable Ausführung die Nutzung der Abwärme ($< 80\text{ °C}$) zur Vorwärmung des Luftstroms für den H_2 -Brenner angesehen. Eine merkliche Deckung des Wärmebedarfs des Dehydrierers ist damit nicht erzielbar. Über diesen Weg kann lediglich eine höhere adiabate Flammtemperatur erzielt werden, was den Wasserstoffbedarf des Brenners senkt. Der Wasserstoffmotor wird mit einem Luftverhältnis von 1,91 betrieben. Hieraus resultiert eine nutzbare Abgastemperatur von 440 °C . Die Simulation zeigt, dass bei einer Vernachlässigung der Verluste in Verrohrungen, in der Abgasnachbehandlung oder in Wärmeübertragern die Vorwärmung des LOHC⁺ zu 100 % und die Reaktionswärme der Dehydrierung zu 29 % durch die Abgasenergie gedeckt werden kann. Der verbleibende Energiebedarf wird über einen Wasserstoffbrenner zugeführt. Dieser kann entweder über ein Gemisch aus freigesetztem Wasserstoff (auf 310 °C) und vorgewärmter Luft bei einem Luftverhältnis von circa 3 betrieben werden. Damit sind Flammtemperaturen von 1200 °C möglich und der Wasserstoffbedarf für den Brenner sinkt etwas. Als Alternative wurde auch die direkte Zündung des Motorabgases betrachtet. Dem nach dem Motor im Abgas enthaltenen Restsauerstoff (magerer Betrieb) werden geringe Mengen des freigesetzten Wasserstoffes zudosiert und das Gemisch gezündet. Durch den hohen Massenstrom des Abgases sind hier nur Temperaturen um 680 °C möglich. Der Wasserstoffbedarf für die Bereitstellung der verbleibenden 71 % der Reaktionswärme ist in beiden Szenarien in etwa deckungsgleich.

Mit diesen Ergebnissen kann der spezifische LOHC-Bedarf des LKWs auf der virtuellen Teststrecke ermittelt werden. Um die Bedarfswerte in Relation zu setzen, wird darüber hinaus die Versorgung des Wasserstoffverbrennungsmotors bzw. der Brennstoffzelle mit Druckwasserstoff bilanziert und ein Vergleich mit batterieelektrischen Antrieben bzw. einem konventionellen Diesel-LKW betrachtet. Die Ergebnisse sind in **Tabelle 7** gelistet. Dabei werden bewusst die für den jeweiligen Energieträger typischen Einheiten verwendet. Es zeigt sich, dass die spezifischen LOHC-Bedarfe mit 274 bzw. $291\text{ L}_{\text{LOHC}^+}/100\text{ km}$ die in Kapitel 5.2.1 und 5.2.2 ermittelten Werte übersteigen obwohl die im Fahrzyklus benötigte mechanische Antriebsenergie bei lediglich $116\text{ kWh}_{\text{mech}}$ liegt. Dies liegt insbesondere daran, dass die Einheit Brennstoffzelle/Elektromotor bzw. der Wasserstoffverbrennungsmotor im Fahrzyklus lediglich einen mittleren Wirkungsgrad von 37,4 % bzw. 33,0 % erreichen (Berechnung erfolgte kennlinienbasiert). Dies schlägt sich direkt auf einen höheren Wasserstoff- und somit LOHC-Bedarf nieder.

Tabelle 7: Spezifischer Kraftstoffbedarf unterschiedlicher Antriebsstränge ermittelt durch eine fahrzyklenbasierte Simulation

Antriebssystem	Verbrauch
Diesel	36,2 $\text{L}_{\text{Diesel}}/100\text{ km}$
H_2 (700 bar) + Wasserstoffverbrennungsmotor	11,3 $\text{kg}_{\text{H}_2}/100\text{ km}$
H_2 (700 bar) + PEM	9,8 $\text{kg}_{\text{H}_2}/100\text{ km}$
LOHC + Wasserstoffverbrennungsmotor	274 $\text{L}_{\text{LOHC}^+}/100\text{ km}$
LOHC + PEM	291 $\text{L}_{\text{LOHC}^+}/100\text{ km}$
Batterieelektrisch	157 $\text{kWh}_{\text{el}}/100\text{ km}$
Batterieelektrisch (mit Rekuperation)	116 $\text{kWh}_{\text{el}}/100\text{ km}$

Es stellt sich in einem nächsten Schritt die Frage, welches Gewicht und welches Volumen für die Speicherung der oben genannten Kraftstoff- bzw. Energiemengen notwendig sind. Berücksichtigt werden hierbei beispielsweise das Eigengewicht bzw. Eigenvolumen des Tankmaterials oder die volumetrische sowie gravimetrische Energiespeicherdichte der Batterie. Die getroffenen Annahmen sind in **Tabelle 13** gelistet. **Abbildung 26** zeigt die Gegenüberstellung der unterschiedlichen Szenarien. Dabei wird ersichtlich, dass Diesel als „unerreichbar“ bezeichnet werden kann und somit Abschied von dem Gedanken vergleichbarer Reichweiten genommen werden muss. Zum anderen wird ersichtlich, dass ein batterieelektrisches System – selbst mit Rekuperation – über 750 kg/100 km und 750 L/100 km aufweist. LOHC schneidet gravimetrisch schlechter, volumetrisch besser ab als die Szenarien mit Druckwasserstoff bei 700 bar. Als absolute Werte können für LOHC als spezifische Systemspeicherdichte Werte von 285...304 kg/100 km und 342...364 L/100 km angegeben werden. Diese Zahlen gelten für den betrachteten Hydrierhub von 90 % und eine Wärmebereitstellung über H₂-Brenner und interne Wärmerückgewinnung.

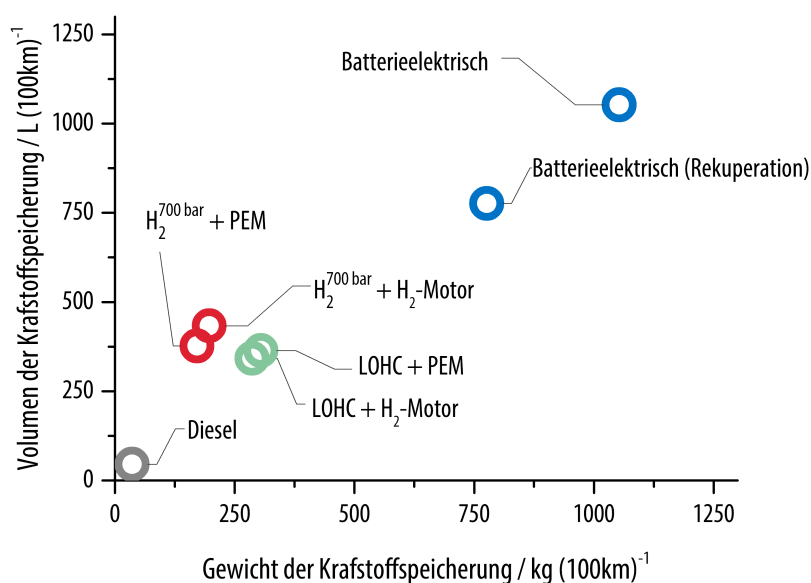


Abbildung 26: Gravimetrische und volumetrische Energiespeicherdichte ermittelt durch eine fahrzyklenbasierte Simulation

Um einen validen Vergleich der Systeme durchzuführen, ist die Einbeziehung aller Komponenten des Antriebsstrangs notwendig. Dazu zählen der Verbrennungsmotor, die Brennstoffzelle, der Elektromotor, die Freisetzungseinheit und im Falle einer Hybridisierung ein H₂-Puffer bzw. eine Leistungsbatterie. Unter Berücksichtigung des Gewichts sowie des Volumens jeder dieser Bauteile sowie der oben diskutierten spezifischen Energiespeicherdichte ist ein vollständiger Systemvergleich durchführbar.

In der Simulation wurde gezeigt, dass die Maximalleistung von circa 360 kW mehrmalig von den Verbrennungsmotoren und dem Elektromotor abgerufen wird. Für die Auslegung der Freisetzungseinheit bzw. der Abschätzung der Dimension spielt die erforderliche Wasserstoffleistung die entscheidende Rolle. Diese setzt sich aus dem Wasserstoffbedarf für den Antrieb und dem Wasserstoffstrom für den H₂-Brenner (Bereitstellung der Freisetzungsenergie) zusammen. **Abbildung 27** zeigt die Häufigkeitsverteilung der geforderten Wasserstoffleistung für den Fahrzyklus. Für den Wasserstoffverbrennungsmotor ist dabei zu erkennen, dass 90 % der Lastzustände unter 475 kW_{H₂} liegen. Im Falle der Brennstoffzelle ergibt sich für 90 % der geforderten Wasserstoffleistungen ein Wert unter 525 kW_{H₂}.

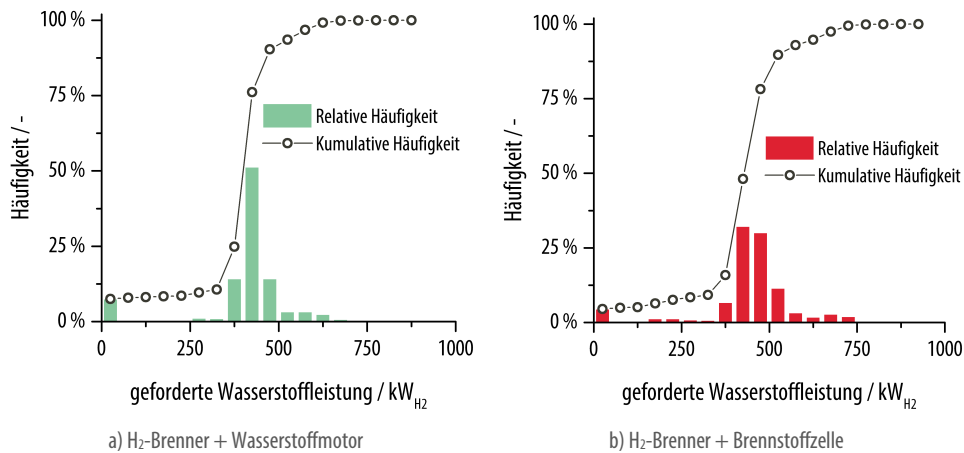


Abbildung 27: Relative Häufigkeit einer spezifischen Wasserstoffleistung im Fahrzyklus

Für den Freisetzer werden diese Grenzen als Basis für die Dimensionierung angenommen und mit den kinetischen Daten aus Kapitel 7.1 das Reaktions- und Freisetzervolumen ermittelt. Wie in Kapitel 5.2 bereits diskutiert, werden zudem ein H₂-Puffer sowie eine Leistungsbatterie eingesetzt, um die Dynamik abbilden zu können. Alle Annahmen für die Leistungsdichte der Brennstoffzelle, der Verbrennungsmotoren sowie des Elektromotors sind im Anhang in **Tabelle 14** zu finden. Die gravimetrische und volumetrische Gegenüberstellung wird für eine Reichweite von 800 km durchgeführt. Dazu sind die spezifischen Kraftstoffbedarfe sowie Tank-/Batteriegrößen entsprechend zu skalieren. **Abbildung 28** zeigt den Systemvergleich.

Wie der Legende zu entnehmen ist, wird dabei auch zwischen dem eigentlichen Tankmaterial (Gewicht, Volumen) und dem Kraftstoff differenziert. Ähnlich bei der Freisetzungseinheit: Der eigentliche Reaktor wird gesondert von der notwendigen Peripherie geführt (vgl. auch Kapitel 7.1).

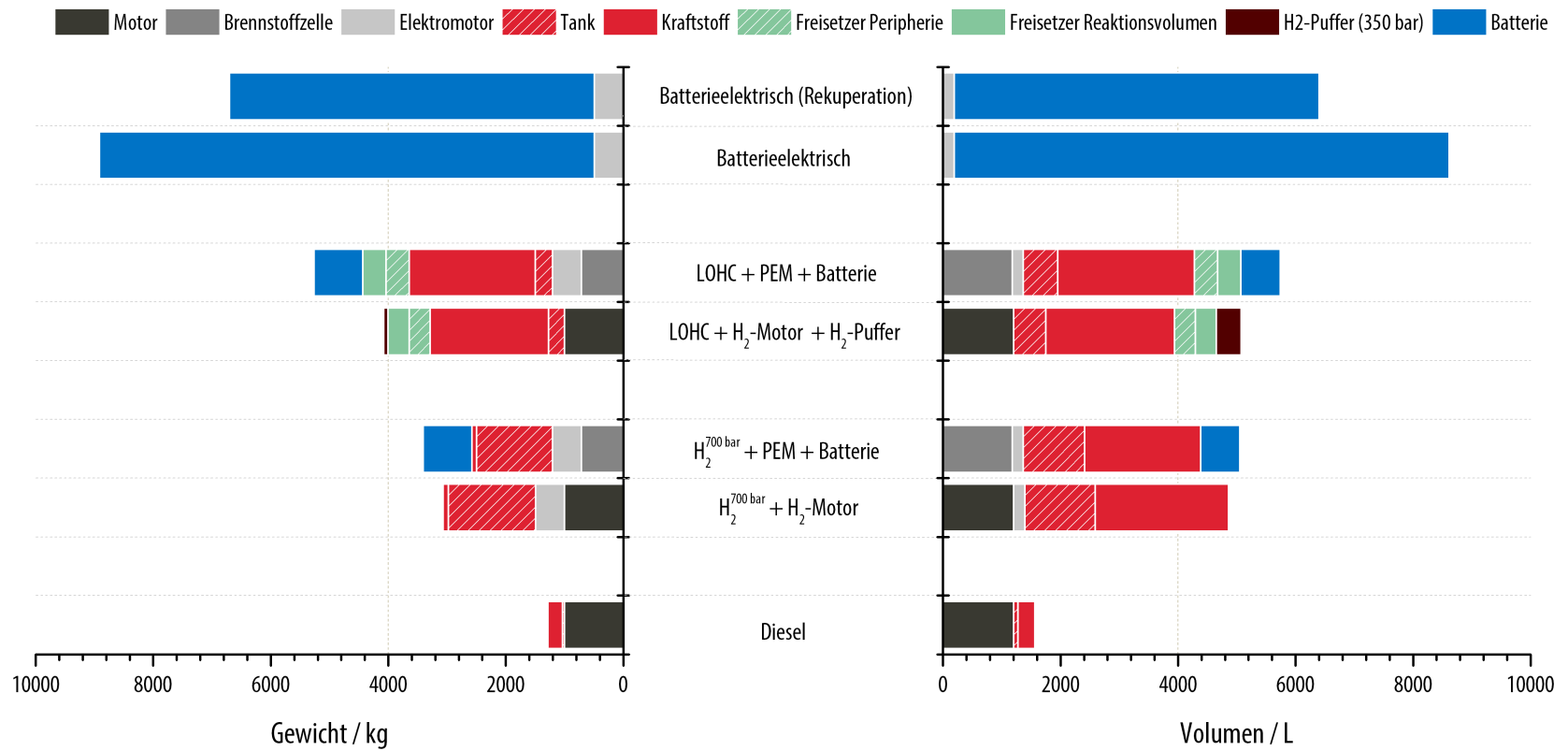


Abbildung 28: Gravimetrische und volumetrische Gegenüberstellung unterschiedlicher Antriebskonzepte unter Berücksichtigung des spezifischen Kraftstoffbedarfs für 800 km

Die Abbildung zeigt sehr deutlich, dass batterieelektrische Systeme für den Schwerlastverkehr und Distanzen von 800 km nicht in Frage kommen (nach aktuellem Stand der Batterietechnik). Darüber hinaus ist ersichtlich, dass Diesel mit einem Systemgewicht von 1.300 kg und einem Volumen von 1,3 m³ dem Spediteur viel Spielraum im Sinne der zulässigen Nutzlast und des Ladevolumens gibt.

Die LOHC- und Druckwasserstoffvarianten siedeln sich zwischen dem batterieelektrischen und dieselbasierten Antrieb an, wobei die LOHC-basierten Szenarien hinsichtlich des Volumens und des Gewichts der Antriebseinheit etwas schlechter abschneiden als 700 bar Wasserstoff. Hinsichtlich der Dimension der Freisetzungseinheit sind maximal 800 L und ein abgeschätztes Gewicht von 800 kg nach heutigem Stand der Technik bereits eine gute Basis für eine mobile Freisetzungseinheit. Der LOHC-Bedarf von knapp 2.400 L_{LOHC+} (mit Brennstoffzelle) für eine Distanz von 800 km überschreitet hingegen die angenommene maximale Tankgröße von 1.500 L (vgl. Fragestellung in Kapitel 7.30).

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass LOHC-basierte Antriebsstränge nach aktuellem Stand der Technik die von den Automobilherstellern geforderten Grenzen mit 4 m³ und 4.000 kg teils knapp überschreiten. Essentielle Aussage ist hierbei, dass nicht die Freisetzungseinheit, sondern der LOHC als Energieträger den Hauptteil des Gewichts bzw. der Masse ausmacht.

Die Gegenüberstellung der LOHC-Konzepte mit H₂-Verbrennungsmotor und Brennstoffzelle zeigt, dass die Wärmeintegration eine entscheidende Rolle spielt. Der Verbrennungsmotor weist zwar einen geringeren Wirkungsgrad auf, kann jedoch 29 % der Reaktionswärme (310 °C) über den heißen Abgasstrom bereitstellen. Das Konzept mit der Brennstoffzelle hat trotz eines besseren Wirkungsgrads einen höheren LOHC-Bedarf und benötigt eine Freisetzungseinheit mit einer höheren Leistung. Anteilig müssen 34 % des mitgeführten LOHCs bzw. 34 % des Reaktionsvolumens allein für die Bereitstellung der Dehydrierwärme berücksichtigt werden. **Abbildung 29** zeigt die Anteile für die Wärmebereitstellung und den Antrieb für beide Konzepte.

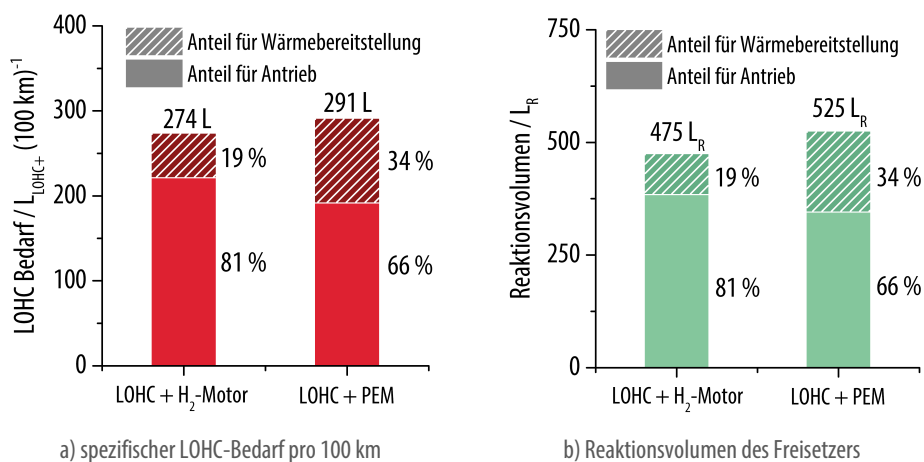


Abbildung 29: Gegenüberstellung der Brennstoffzelle und des Wasserstoffverbrennungsmotor in Verbindung mit dem LOHC Konzept – Anteile für Antrieb- und H₂-Brenner

Für die Effizienz der Antriebseinheit darf nicht die Wandlungseinheit (Verbrennungsmotor, Brennstoffzelle) isoliert betrachtet werden. Es gilt vielmehr die Einheit aus Freisetzer und Wandlungseinheit zu bewerten. Hierbei schneidet der Wasserstoffverbrennungsmotor im Vergleich zur Brennstoffzelle durch die Möglichkeit der Bereitstellung eines Teils der Reaktionswärme ($> 300\text{ °C}$) besser ab. Damit ist der LOHC-Bedarf pro km Fahrstrecke geringer. Der Freisetzer kann zudem kleiner dimensioniert werden.

9 LOHC im Schwerlastverkehr –

ein Konzept mit großem Potenzial

Der Einsatz eines LOHC-basierten Antriebsstrangs im Schwerlastverkehr ermöglicht einen emissionsfreien Güterfernverkehr. Dabei wird Wasserstoff als Kraftstoff eingesetzt. Besonderheit der hier untersuchten Technologie ist, dass der Wasserstoff nicht in elementarer Form, sondern gebunden an eine Trägersubstanz (LOHC) eingesetzt wird. Die Eigenschaften der flüssigen Trägersubstanz sind vergleichbar mit Diesel. Entscheidender Unterschied ist jedoch, dass der hier untersuchten LOHC (Dibenzyltoluol, Perhydro-Dibenzyltoluol) nicht als Gefahrstoff klassifiziert ist.

In einer zentralen oder dezentralen Elektrolyse wird Wasserstoff erzeugt. Mittels einer Hydriereinheit kann dieser in LOHC gebunden werden. Maximal kann eine Beladung von 6,2 Gew.-% realisiert werden. Um eine derartige stoffliche Wasserstoffdichte zu erzielen, müsste elementarer Wasserstoff auf einen Druck über 1.200 bar verdichtet werden.

Der wasserstoffreiche LOHC kann mit der konventionellen Kraftstoffinfrastruktur transportiert und gelagert werden. An einer LOHC-Tankstelle erfolgt schließlich die Betankung eines LKWs mit LOHC. Fahrzeugseitig wird anschließend in einer Freisetzungseinheit der Wasserstoff freigesetzt und kann mit einem Wasserstoffverbrennungsmotor oder einer Brennstoffzelle (und Elektromotor) zur Bereitstellung der Antriebsenergie umgesetzt werden. Der entladene LOHC wird bei dem nächsten Tankvorgang aus dem LKW gefördert und erneut wasserstoffreiches LOHC getankt. LOHC wird demnach nicht verbraucht, sondern dient lediglich als H₂-Trägersubstanz.

Im Rahmen dieser Machbarkeitsstudie wurde eine Voruntersuchung zur technologischen und ökologischen Eignung der LOHC-Technologie für den Einsatz im Schwerlastverkehr durchgeführt. Der Fokus lag dabei auf der Erfassung des IST-Zustandes der Antriebskonzepte im Schwerlastverkehr, der Identifizierung der Anforderungen an die LOHC-Technologie für mobile Anwendungen sowie eine erste Konzeptstudie über eine mögliche LOHC-Infrastruktur. Das Ziel, der emissionsfreie Schwerlastverkehr, lässt sich auf der Basis von Wasserstoff auf zwei Wegen realisieren: Verbrennungsmotor und Brennstoffzelle, beide natürlich ohne messbare Emissionen.

Grundlegend zeigt diese Studie, dass LOHC-basierte Antriebsstränge das Potenzial haben, die Anforderungen der Automobilindustrie zu erfüllen. Bereits mit aktuellem Stand der Technik können Reichweiten von knapp 600 km erzielt werden. Dabei ist weniger das Volumen des Antriebsstrangs limitierend, sondern das maximal zulässige Tankvolumen von 1.500 L_{Kraftstoff}. An diesem Punkt ist Abhilfe in Sicht, so dass die Reichweite auf die Werte erhöht werden kann, die heute im Schwerlastverkehr üblich sind. Bei der Angabe der Effizienz der Antriebseinheit ist die Wandlungseinheit (Verbrennungsmotor, Brennstoffzelle) nicht isoliert zu betrachten. Der Freisetzer und die Brennstoffzelle bzw. der Motor interagieren über die Wärmebereitstellung der Reaktionswärme für die H₂-Freisetzung miteinander. Hinsichtlich der Gesamteffizienz schneidet der Wasserstoffverbrennungsmotor – trotz geringerer Wirkungsgrad im Vergleich zur Brennstoffzelle – durch die Möglichkeit der Bereitstellung eines Teils der Reaktionswärme (> 300 °C) besser ab.

Mittelfristig (nach 2023) könnte die technologische Option einer Direkt-LOHC-Brennstoffzelle besonders interessant sein, um schwere LKW anzutreiben [94]. Hierbei wird der Wasserstoff-beladene LOHC direkt in einer Brennstoffzelle verstromt. Die Freisetzung von elementarem Wasserstoff an Bord entfällt dadurch. Weitere Vorteile ergeben sich dadurch, dass der zweifache Katalysatorbedarf für Dehydrierer und Brennstoffzelle entfällt und das Volumen der Wasserstofffreisetzungseinheit anderweitig genutzt werden kann. Durch die Kombination des exothermen Brennstoffzellenbetriebs mit der endothermen Wasserstofffreisetzung in einem Apparat kann die Betriebstemperatur der Verstromungseinheit auf unter 200 °C abgesenkt werden, was die Dynamik der Bereitstellung elektrischer Energie aus LOHC-Systemen weiter verbessern sollte. Erste Direkt-LOHC-Brennstoffzellen wurden in den Labors des Helmholtz-Instituts Erlangen-Nürnberg und der FAU in den letzten zwölf Monaten erfolgreich realisiert. Um die Leistungsdichte der Direkt-LOHC-Brennstoffzelle weiter zu steigern, ist jedoch eine weitere Optimierung der Membran-Elektroden-Einheit (MEA) und der Diffusions- und Verteilschichten notwendig.

Hinsichtlich der LOHC-Infrastruktur wird in dieser Studie gezeigt, dass das LOHC-Konzept insbesondere gegenüber der Druckwasserstoffspeicherung entscheidende Vorteile aufweist. Die aktuelle Kraftstoffinfrastruktur kann mit wenigen Modifikationen genutzt werden. Sowohl konventionelle Transportvektoren (Tanklastwagen) als auch Lagertanks sind grundsätzlich LOHC-kompatibel. Hinsichtlich der Zapfsäule und Zapfpistole sind geringe Modifikationen notwendig, die nach Rücksprache mit Industrievertretern in absehbarer Zeit realisierbar sind. Die Installation sowie der Betrieb einer LOHC-Tankstelle ist aus sicherheitstechnischen Gesichtspunkten ohne Einschränkungen realisierbar. Die sukzessive Einführung von LOHC als Kraftstoff ist in der Infrastruktur ausgesprochen preisgünstig. Allerdings reicht das heutige regenerative Angebot an Elektrizität bei weitem nicht aus, um den nötigen Wasserstoff zu erzeugen. Die Ausweitung der erneuerbaren Energien und der Import von LOHC, der mit Wasserstoff aus erneuerbaren Energien hergestellt wurde, sind eine zwingende Voraussetzung. Die Energiewende ist nicht nur eine Stromwende!

Kernpunkt dieser Studie ist schließlich die Beschreibung des aktuellen Stands der Technik aller Komponenten, die für eine LOHC-Infrastruktur sowie für einen LOHC-basierten Antriebsstrang von Bedeutung sind. Neben den technischen Aspekten werden hierbei auch die gesetzlichen Rahmenbedingungen betrachtet, die für die Einführung von LOHC als Kraftstoff berücksichtigt werden müssen. Durch die Formulierung konkreter Arbeitspakete werden Handlungsanweisungen gegeben, die für den Aufbau eines Prototyps und die Installation einer LOHC-Infrastruktur in einer Pilotregion anzuwenden sind.

Anhang

Tabelle 8: Allgemeingültige Fahrzeugdaten [41]

Typ	Sattelzug mit 40 Tonnen zulässigem Gesamtgewicht; Sattelzugmaschine mit Fernfahrerhaus; Kofferauflieger;
Gesamtgewicht	40.000 kg
Frontfläche	5,30 m ²
c_w-Wert	0,53
Bereifung Antriebsachse	315/70R22,5
Gesamt-Rollwiderstand	5,37 N/kN
Nebenverbraucher	Lüfter (P _m =0,52 kW); Luftpresser (P _m =1,59 kW); Lenkhilfpumpe (P _m =0,72 kW); Klimaanlage (P _m =0,36 kW); Generator (P _m =1,367 kW); Elektrische Verbraucher (P _m =4,56 kW); Alle Werte von Nenndrehzahl über Drehzahl skaliert

Tabelle 9: Eingangsdaten für dieselbetriebenes Fahrzeug [95]

Antrieb	12,42l-Reihensechszylinder (MAN D2676) mit zweistufiger Turboaufladung und Ladeluftkühlung
Leistung / Drehmoment	324 kW bei 1800 U/min 2390 Nm bei 930 bis 1400 U/min
Max. Wirkungsgrad	44,0 %
Getriebe	ZF 12 AS 2331 DD; 12 Gänge (i = 15,86 bis 1)
Achsübersetzung	i = 2,7

Tabelle 10: Eingangsdaten für Wasserstoff-Ottomotor [96]

Antrieb	16,67l Achtzylinder (ähnlich 2G Agenitor 408) mit Turboaufladung und Ladeluftkühlung
Leistung / Drehmoment	374 kW bei 1500 U/min 2300 Nm bei 1200 bis 2000 U/min
Max. Wirkungsgrad	44,2 %
Getriebe	ZF 16 AS 2630 T0; 16 Gänge ($i = 14,12$ bis $0,83$)
Achsübersetzung	$i = 3,0$
Luftverhältnis	$\lambda = 1,91$
Abgastemperatur nach Turbine	440°C

Tabelle 11: Eingangsdaten für Elektromotor (abgeleitet aus [97])

Antrieb	Drehstrom-Asynchronantrieb (skaliert von Tesla Modell S P85 [97])
Leistung / Drehmoment	376 kW bei 5000 U/min 729 Nm bei 0 bis 4700 U/min
Konstanter Wirkungsgrad inkl. Umrichter (Annahme)	85,0 % (Dyn. Betrieb: 78 bis 92% [98])
Getriebe	Feste Übersetzung: $i = 6,3$
Achsübersetzung	$i = 3,0$

Tabelle 12: Eingangsdaten LOHC-System

Systemspeicherdichte	5,6 Ma.-%
Dehydriertemperatur	310 °C
Energiebedarf: Vorwärmung	3,26 kWh / (kg _{H2})
Energiebedarf: Dehydrierung	9,15 kWh / (kg _{H2})
Luftverhältnis: Dehydrierheizung	$\lambda = 1,91$
Temperatur: Dehydrierheizung	1347 °C

Tabelle 13: Kennzahlen zur Ermittlung des Volumens und des Gewichtes der jeweiligen Energiespeicher auf stofflicher und systemischer Ebene¹⁴

Komponente	Teilbilanz		Systembilanz		Quelle
	gravimetrisch	volumetrisch	gravimetrisch	volumetrisch	
Druckwasserstoff		25,19 L _{H2} /kg _{H2}	17,5 kg _{System} /kg _{H2}	1,53 L _{System} /L _{H2}	[45, 48, 99]
Batterie			8,3 kg _{System} /kWh _{el}	6,7 L _{System} /kWh _{el}	[48]
Flüssigkeitstank			0,125 kg _{Tank} /L _{Flüssigkeit}	1,25 L _{Tank} /L _{Flüssigkeit} ¹⁵	[100]
Freisetzer	0,89 kW _{H2} /kg _{Reaktor}	1,33 kW _{H2} /L _{Reaktor}	0,44 kW _{H2} /kg _{Freisetzer}	0,66 kW _{H2} /L _{Freisetzer}	Vgl. Kap. 7.1

Tabelle 14: Spezifisches Volumen und Gewicht der Brennstoffzelle, der Verbrennungsmotoren sowie des Elektromotors (Skalierung in Anlehnung an kommerziell erhältliche Systeme ähnlicher Leistungsklasse)

Komponente	gravimetrisch	volumetrisch	Quelle
Brennstoffzelle	0,28 kW _{mech} /kg	0,17 kW _{mech} /L	HYDROGENICS HYPMHD 180 [88]
Diesel-Verbrennungsmotor	0,36 kW _{mech} /kg	0,30 kW _{mech} /L	MAN D2676 [101]
H ₂ -Verbrennungsmotor	s. Diesel-Verbrennungsmotor	s. Diesel-Verbrennungsmotor	
Elektromotor	0,73 kW _{mech} /kg	1,90 kW _{mech} /L _{Freisetzer}	tm4 SUMO HD [102]

¹⁴ In den Spalten „Systembilanz“ wird neben der dem stofflichen Volumen bzw. dem stofflichen Gewicht auch der Tank bzw. die notwendige Peripherie berücksichtigt. Die Umrechnung von der stofflichen Ebene auf die Systemebene wird dabei mit einem Umrechnungsfaktor durchgeführt. Die Einheit dieses Faktors ist beispielsweise kg_{System}/kg_{H2} oder L_{System}/L_{H2}.

¹⁵ Annahme

Kontakte im Rahmen dieses Projektes

- » **Adapt-engineering GmbH & Co. KG**, Nordhausen
- » **Audi AG**, Ingolstadt
- » **Bundesverband Güterkraftverkehr Logistik und Entsorgung (BGL) e.V.**, Frankfurt am Main
- » **Daimler AG**, Stuttgart
- » **ELAFLEX HIBY Tanktechnik GmbH & Co. KG**, Hamburg
- » **Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg**
(Lehrstuhl für Chemische Reaktionstechnik & Lehrstuhl für Technische Thermodynamik), Erlangen
- » **Gilbarco Veeder-Root**, Hamburg
- » **Hochschule Bonn-Rhein-Sieg**, Sankt Augustin
- » **Hydrogenious Technologies GmbH**, Erlangen
- » **IAV GmbH**, Gifhorn
- » **JET Tankstellen Deutschland GmbH**, Hamburg
- » **Karlsruher Institut für Technologie** (Institut für Mikroverfahrenstechnik), Karlsruhe
- » **Keyou GmbH**, München
- » **L'Orange GmbH**, Stuttgart
- » **Linde AG**, München
- » **MAN Truck & Bus AG**, Nürnberg
- » **Mainzer Stadtwerke AG**, Mainz
- » **NOW GmbH**, Berlin
- » **Phillips 66 Continental Holding GmbH**, Hamburg
- » **Physikalisch-Technische Bundesanstalt**, Braunschweig
- » **Projektträger Jülich**, Berlin
- » **Scheidt & Bachmann GmbH**, Mönchengladbach
- » **Schrader-T+A Fahrzeugbau GmbH & Co. KG**, Beckum
- » **Stadtwerke Haßfurt**, Haßfurt
- » **Technische Universität Bergakademie Freiberg**
(Institut für Energieverfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen), Freiberg
- » **ThyssenKrupp AG**, Essen
- » **Volkswagen AG**, Wolfsburg
- » **WIND-WASSERSTOFF-projekt GmbH & Co. KG**, Börgerende
- » **WINGAS GmbH**, Kassel

Workshops - Teilnehmende Firmen und Institute

LOHC Infrastruktur (20. Juni 2017, 18 Teilnehmer)

- » ELAFLEX HIBY Tanktechnik GmbH & Co. KG, Hamburg
- » Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (Lehrstuhl für Chemische Reaktionstechnik & Lehrstuhl für Technische Thermodynamik), Erlangen
- » Gilbarco Veeder-Root, Hamburg
- » Hydrogenious Technologies GmbH, Erlangen
- » JET Tankstellen Deutschland GmbH, Hamburg
- » Keyou GmbH, München
- » NOW GmbH, Berlin
- » Phillips 66 Continental Holding GmbH, Hamburg
- » Schrader-T+A Fahrzeugbau GmbH & Co. KG, Beckum
- » Stadtwerke Haßfurt
- » Volkswagen AG, Wolfsburg

Wasserstoffverbrennungsmotor & LOHC-Konzept (3. Juli 2017, 18 Teilnehmer)

- » Adapt-engineering GmbH & Co. KG, Nordhausen
- » Daimler AG, Stuttgart
- » Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (Lehrstuhl für Chemische Reaktionstechnik & Lehrstuhl für Technische Thermodynamik), Erlangen
- » Hochschule Bonn-Rhein-Sieg, Sankt Augustin
- » Hydrogenious Technologies GmbH, Erlangen
- » Keyou GmbH, München
- » L'Orange GmbH, Stuttgart
- » MAN Truck & Bus AG, Nürnberg

LOHC in der Mobilität – Baugrößen und H₂-deNO_x (6. Juli 2017, 14 Teilnehmer)

- » Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (Lehrstuhl für Chemische Reaktionstechnik & Lehrstuhl für Technische Thermodynamik), Erlangen
- » Hydrogenious Technologies GmbH, Erlangen
- » Karlsruher Institut für Technologie (Institut für Mikroverfahrenstechnik), Karlsruhe
- » Keyou GmbH, München
- » MAN Truck & Bus AG, Nürnberg
- » NOW GmbH, Berlin
- » Projektträger Jülich, Berlin
- » Technische Universität Bergakademie Freiberg (Institut für Energieverfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen), Freiberg

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Auszug aus den Stoffdatenblättern von Dibenzltoluol und Perhydro-Dibenzyltoluol.....	29
Tabelle 2: Speicherdichte und Effizienz von DBT (H18-DBT) für unterschiedliche Bereitstellungsszenarien der Dehydrierwärme	31
Tabelle 3: Bilanzierung eines LOHC-basierten Antriebsstrangs mit Wasserstoffverbrennungsmotor - spezifischer Wasserstoff- und LOHC-Bedarf, Freisetzungsratesowie Reichweite).....	46
Tabelle 4: Bilanzierung eines LOHC-basierten Antriebsstrangs mit Brennstoffzelle - spezifischer Wasserstoff- und LOHC-Bedarf, Freisetzungsratesowie Reichweite.....	50
Tabelle 5: Energiebilanzierung einer konventionellen (fossilen) Tankstelle	61
Tabelle 6: Bilanzierung einer Wasserstofftankstelle – Differenzierung zwischen 700 bar Druckwasserstoff und LOHC als Wasserstoffträger	62
Tabelle 7: Spezifischer Kraftstoffbedarf unterschiedlicher Antriebsstränge ermittelt durch eine fahrzyklenbasierte Simulation.....	80
Tabelle 8: Allgemeingültige Fahrzeugdaten	89
Tabelle 9: Eingangsdaten für dieselbetriebenes Fahrzeug.....	89
Tabelle 10: Eingangsdaten für Wasserstoff-Ottomotor	90
Tabelle 11: Eingangsdaten für Elektromotor.....	90
Tabelle 12: Eingangsdaten LOHC-System.....	90
Tabelle 13: Kennzahlen zur Ermittlung des Volumens und des Gewichtes der jeweiligen Energiespeicher auf stofflicher und systemischer Ebene.....	91
Tabelle 14: Spezifisches Volumen und Gewicht der Brennstoffzelle, der Verbrennungsmotoren sowie des Elektromotors.....	91

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Treibhausgasemissionen des Personen- und Güterverkehrs im Jahr 2012, Datengrundlage	2
Abbildung 2: Entwicklung des Transportaufkommens und der Transportleistung im straßengebundenen Güterverkehr.....	6
Abbildung 3: Differenzierung des Fahrzeugbestands im Güterkehr nach zulässigem Gesamtgewicht	7
Abbildung 4: Bestandsentwicklung von Nutzfahrzeugen	7
Abbildung 5: Antriebskonzepte von Nutzfahrzeugen nach zulässiger Nutzlast	8
Abbildung 6: Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland	11
Abbildung 7: Kostenuntergrenze synthetisierter Kraftstoffe basierend auf den Produktionskosten des eingesetzten Wasserstoffs... 15	
Abbildung 8: Vergleich alternativer Kraftstoffe unter den Gesichtspunkten des elektrischen Energieaufwands für die Bereitstellung der Synthese-Edukte und des spezifischen Kraftstoffbedarfs.....	18
Abbildung 9: Vergleich alternativer Kraftstoffe unter den Gesichtspunkten der thermischen und mechanischen Speicherdichte.....	21
Abbildung 10: Grundprinzip der Speicherung von Wasserstoff in LOHCs	23
Abbildung 11: Konzept der Speicherung von Wasserstoff mit dem LOHC-System Dibenzyltoluol/Perhydro-Dibenzyltoluol	27
Abbildung 12: Gegenüberstellung der Wasserstoffdichte von Druckwasserstoff und LOHC.....	33
Abbildung 13: Abhängigkeit der volumetrischen Energiespeicherdichte von dem bereitzustellenden Anteil der Dehydrierwärme... 34	
Abbildung 14: Grundschemata eines LOHC-basierten Antriebsstrangs mit on-board Wasserstofffreisetzung	37
Abbildung 15: LOHC-basierter Antriebsstrang mit on-board Wasserstofffreisetzung und Wasserstoffverbrennungsmotor	42
Abbildung 16: Stoffliches Volumen eines Wasserstoffpuffers in Abhängigkeit des Drucks	44
Abbildung 17: LOHC-basierter Antriebsstrang mit on-board Wasserstofffreisetzung und Brennstoffzelle	48
Abbildung 18: Gegenüberstellung von Druckwasserstoff-basierten und LOHC-basierten Antriebskonzepten hinsichtlich des stofflichen Speichervolumens und des spezifischen Strombedarfs für die Elektrolyse (elektrische Primärenergie) für den Antrieb	52
Abbildung 19: Allgemeines Schema der LOHC-Infrastruktur	56
Abbildung 20: LOHC-Infrastruktur mit einer zentralen Wasserstoffbereitstellung	57
Abbildung 21: LOHC-Infrastruktur mit einer dezentralen Wasserstoffbereitstellung	57
Abbildung 22: Pilotanlage zur Freisetzung von Wasserstoff aus LOHC.....	68
Abbildung 23: Kennlinie zur Auslegung der Freisetzungseinheit.....	70
Abbildung 24: Pilotanlage zur Speicherung von Wasserstoff in LOHC.....	73
Abbildung 25: ACEA Long Haul Cycle.....	79
Abbildung 26: Gravimetrische und volumetrische Energiespeicherdichte ermittelt durch eine fahrzyklenbasierte Simulation	81
Abbildung 27: Relative Häufigkeit einer spezifischen Wasserstoffleistung im Fahrzyklus	82
Abbildung 28: Gravimetrische und volumetrische Gegenüberstellung unterschiedlicher Antriebskonzepte unter Berücksichtigung des spezifischen Kraftstoffbedarfs für 800 km	83
Abbildung 29: Gegenüberstellung der Brennstoffzelle und des Wasserstoffverbrennungsmotor in Verbindung mit dem LOHC Konzept – Anteile für Antrieb- und H ₂ -Brenner.....	84

Literaturverzeichnis

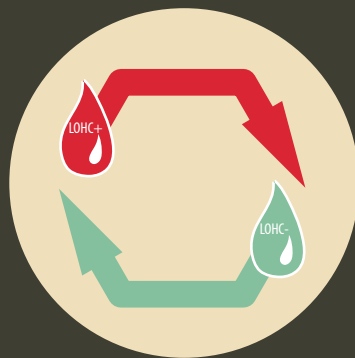
- [1] Sabine Radke, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Verkehr in Zahlen 2013/2014, 2013, http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/verkehr-in-zahlen-pdf.zip?__blob=publicationFile
- [2] Naturschutz Bundesministerium für Umwelt, Bau und Reaktorsicherheit, Klimaschutzplan 2050 - Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung 2016, http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimaschutzplan_2050_bf.pdf
- [3] Deutscher Bundestag, Drucksache 18/2296 „Klimaschutz im Verkehrssektor“, 2017, <http://dip21.bundestag.de/dip21/btd/18/024/1802426.pdf>
- [4] Andrea Hütter, Statistisches Bundesamt, Verkehr auf einen Blick, 2013, https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/TransportVerkehr/Querschnitt/BroschuereVerkehrBlick0080006139004.pdf?__blob=publicationFile
- [5] Birgit Georgi Stefan Rodt, Burkhard Huckestein, Lars Mönch, Reinhard Herbener, Helge Jahn, Katharina Koppe, Jörn Lindmaier Umweltbundesamt, CO₂-Emissionsminderung im Verkehr in Deutschland - Mögliche Maßnahmen und ihre Minderungspotenziale - Ein Sachstandsbericht des Umweltbundesamtes, 2010, <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/3773.pdf>
- [6] Statistisches Bundesamt, Statistik zum Güterverkehr, <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/TransportVerkehr/Gueterverkehr/Tabellen/GueterbefoerderungLR.html>
- [7] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Gleitende Mittelfristprognose für den Personen- und Güterverkehr - Mittelfristprognose Winter 2015/2016, https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/mittelfristprognose-2016.pdf?__blob=publicationFile
- [8] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Verkehrsverflechtungsprognose 2030, Los 3: Erstellung der Prognose der deutschlandweiten Verkehrsverflechtungen unter Berücksichtigung des Luftverkehrs, https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/verkehrsverflechtungsprognose-2030-zusammenfassung-los-3.pdf?__blob=publicationFile
- [9] Kraftfahr-Bundesamt, Fahrzeugzulassungen (FZ) - Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach Zulassungsbezirken - 1. Januar 2016 - FZ1, 2016, http://www.kba.de/SharedDocs/Publikationen/DE/Statistik/Fahrzeuge/FZ/2016/fz1_2016_.pdf.pdf;jsessionid=2D08FE55D9EC86AA7051195D9439DFC7.live11292?__blob=publicationFile&v=8
- [10] B. Lenz, Lischke, G., (...), Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt Shell Deutschland Oil GmbH, Shell Nutzfahrzeug-Studie - Diesel oder alternative Antriebe - Womit fahren LKW und Bus morgen, 2016, Hamburg, http://www.dlr.de/dlr/Portaldata/1/Resources/documents/2016/PDF_Shell_Nutzfahrzeugstudie_2016.pdf
- [11] Kraftfahr-Bundesamt, Fahrzeugzulassungen (FZ) - Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach Umwelt-Merkmalen - 1. Januar 2016 - FZ13, 2016, http://www.kba.de/SharedDocs/Publikationen/DE/Statistik/Fahrzeuge/FZ/2016/fz13_2016_.pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=3
- [12] P. Kurzweil, O. K. Dietlmeier, *Elektrochemische Speicher - Superkondensatoren, Batterien, Elektrolyse-Wasserstoff, Rechtliche Grundlagen*. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2015.

- [28] Shell Deutschland Oil GmbH, Shell Wasserstoffstudie – Energie der Zukunft? Nachhaltige Mobilität durch Brennstoffzelle und H₂, 2017, Hamburg, http://www.shell.de/medien/shell-publikationen/shell-hydrogen-study/_jcr_content/par/toptasks_e705.stream/1497968981764/0c6e4c3c838e73351b155afa848c829977d9f0348d9bf21fdfe9643a0fde3151/shell-wasserstoff-studie-2017.pdf
- [29] Joan M. Ogden, Margaret M. Steinbugler, Thomas G. Kreutz, *Journal of Power Sources* 1999, 79 (2), 143-168.
- [30] e-mobil BW GmbH – Landesagentur für Elektromobilität und Brennstoffzellentechnologie, Wasserstoff-Infrastruktur für eine Nachhaltige Mobilität – Entwicklungsstand und Forschungsbedarf, 2013, http://www.e-mobilbw.de/files/e-mobil/content/DE/Publikationen/PDF/Wasserstoff-Infrastruktur%20fuer%20eine%20nachhaltige%20Mobilitaet%20-%20final_WEB.pdf
- [31] Thomas Grube, Bernd Höhlein, in *Wasserstoff und Brennstoffzelle: Technologien und Marktperspektiven*, Eds: Johannes Töpler, Jochen Lehmann), Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg 2014.
- [32] finanzen.net, Erdgaspreis - Natural Gas, Kurszeit 21.06.2017, Internetseite, online verfügbar: <http://www.finanzen.net/rohstoffe/Erdgas-Preis-Natural-Gas/euro>
- [33] Penpet - Petrochemical Trading, News Methanol April 2017, Internetseite, online verfügbar: <http://www.penpet.de/news/news-methanol-april-2017.html>
- [34] Michael Sterner, *Bioenergy and renewable power methane in integrated 100% renewable energy systems*. Erneuerbare Energien und Energieeffizienz kassel university press GmbH, Kassel, 2009.
- [35] Andreas Bandi, Michael Specht, Thomas Weimer, Karlheinz Schaber, *Energy Conversion and Management* 1995, 36 (6), 899-902.
- [36] Xiaoming Ren, Piotr Zelenay, Sharon Thomas, John Davey, Shimshon Gottesfeld, *Journal of Power Sources* 2000, 86 (1), 111-116.
- [37] Karsten Müller, Wolfgang Artl, in *Renewable Energy: Economics, Emerging Technologies and Global Practices*, Nova Publishers, New York 2013.
- [38] H. Eichlseder, M. Klell, in *Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik: Erzeugung, Speicherung, Anwendung*, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden 2012.
- [39] W. Peschka, *Liquid hydrogen - fuel of the future*. Springer, Wien, 1992.
- [40] R. Pischinger, M. Klell, T. Sams, *Thermodynamik der Verbrennungskraftmaschine*. Springer, Wien, 2009.
- [41] Frank Dünnebeil, Carsten Reinhard, Udo Lambrecht, Antonius Kies, Stefan Hausberger, Martin Rexeis, Naturschutz Umweltbundesamt - Bundesministerium für Umwelt, Bau und Reaktorsicherheit, Zukünftige Maßnahmen zur Kraftstoffeinsparung und Treibhausgasminderung bei schweren Nutzfahrzeugen, 2015, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_32_2015_kraftstoffeinsparung_bei_nutzfahrzeuge.pdf
- [42] Maximilian Kloess, Peter Prenninger, Arno Huss, Kurt Könighofer, Lorenza Canella, Reinhard Haas, Innovation und Technologie - Abteilung Mobilitäts- und Verkehrstechnologien - Österreich Bundesministerium für Verkehr, Potenziale effizienter Nutzfahrzeugantriebe für einen nachhaltigen Straßengüterverkehr bis 2050, 2011, Wien, <https://www2.ffg.at/verkehr/file.php?id=342>
- [43] Troy A. Semelsberger, Rodney L. Borup, Howard L. Greene, *Journal of Power Sources* 2006, 156 (2), 497-511.
- [44] Neutrium - Heat of Combustion, Internetseite, online verfügbar: https://neutrium.net/heat_transfer/heat-of-combustion/
- [45] W. Wagner, U. Overhoff, *ThermoFluids* 2006,
- [46] Linde AG, The Ionic Compressor 90 MPa - IC90. Datasheet, <https://refman.energytransitionmodel.com/publications/2021/download>

- [47] Jayakrishnan Krishnan Unni, Premakumara Govindappa, Lalit Mohan Das, *International Journal of Hydrogen Energy* 2017, 42 (1), 643-651.
- [48] Pavel Novak, in *Präsentation bei Keyou GmbH*, Novak Composites, Nordhausen 2017.
- [49] Reinhold Wurster, Ulrich Schmidtchen, Deutscher Wasserstoff- und Brennstoffzellenverband, DWV Wasserstoff-Sicherheits-Kompendium, 2011, Berlin, https://www.energiesdienst.de/fileadmin/energiesdienst/Dokumente/Unternehmen/Aktuelle_Projekte/Wasserstoffanalge/Wasserstoff_Kompendium.pdf
- [50] Amgad Elgowainy, Scott Weil, Daryl Brown, Mark Paster, U.S. department of energy, Hydrogen Refueling Infrastructure Options for Early Fuel Cell Vehicle Markets, 2012, 10.13140/RG.2.1.3029.9761
- [51] M. Melaina, M. Penev, National Renewable Energy Laboratory, Hydrogen Station Cost Estimates - Comparing Hydrogen Station Cost Calculator Results with other Recent Estimates, 2013, Golden, <http://www.nrel.gov/docs/fy13osti/56412.pdf>
- [52] Philipp Braunsdorf (NOW GmbH), Persönliche Kommunikation, Diskussion im Rahmen des Workshops "LOHC-Infrastruktur" zum Thema Kosten einer Wasserstofftankstelle, Erlangen, 14.06.2017
- [53] Karsten Müller, Daniel Teichmann, Peter Wasserscheid, Wolfgang Arlt, in *Kraftwerkstechnik - Sichere und nachhaltige Energieversorgung*, (Ed: A. Hurtado M. Beckmann), TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin 2012.
- [54] Karsten Müller, Johannes Völkl, Wolfgang Arlt, *Energy Technology* 2013, 1 (1), 20-24.
- [55] H.G. Oswin, *US3416966 A*, 1968.
- [56] O Sultan, H Shaw, *NASA STI/Recon Technical Report N 1975, 76*, 33642.
- [57] Mieczyslaw Taube, Peter Taube, *A Liquid Organic Carrier of Hydrogen as a Fuel for Automobiles: Nuclear Power as a Motive Power for Cars*. Eidg. Institut für Reaktorforschung Würenlingen, 1979.
- [58] Mieczyslaw Taube, DWT Rippin, DL Cresswell, W Knecht, *International Journal of Hydrogen Energy* 1983, 8 (3), 213-225.
- [59] M Taube, D Rippin, W Knecht, D Hakimifard, B Milisavljevic, N Gruenenfelder, *International Journal of Hydrogen Energy* 1985, 10 (9), 595-599.
- [60] Thomas Justus Schmidt, Director Swiss Competence Center for Energy Research (SCCER) - Heat & Electricity Storage, Persönliche Kommunikation, Informationen zum LOHC-Truck aus den 80er Jahren, 2017
- [61] L. Bagzis, J. Appleby, G. Pez, A. Cooper, *Patentanmeldung US20050013767 A1*, 2005.
- [62] Katarzyna Morawa Eblagon, Kin Tam, KM Kerry Yu, Shu-Lei Zhao, Xue-Qing Gong, Heyong He, Lin Ye, Lu-Cun Wang, Anibal J Ramirez-Cuesta, Shik Chi Tsang, *The Journal of Physical Chemistry C* 2010, 114 (21), 9720-9730.
- [63] Marek Sobota, Ioannis Nikiforidis, Max Amende, Beatriz Sanmartín Zanón, Thorsten Staudt, Oliver Höfert, Yaroslava Lykhach, Christian Papp, Wolfgang Hieringer, Mathias Laurin, Daniel Assenbaum, Peter Wasserscheid, Hans-Peter Steinrück, Andreas Görling, Jörg Libuda, *Chemistry – A European Journal* 2011, 17 (41), 11542-11552.
- [64] Daniel Teichmann, Wolfgang Arlt, Peter Wasserscheid, *International Journal of Hydrogen Energy* 2012, 37 (23), 18118-18132.
- [65] Ming Yang, Yuan Dong, Shunxin Fei, Hanzhong Ke, Hansong Cheng, *International Journal of Hydrogen Energy* 2014, 39 (33), 18976-18983.
- [66] Vladimir N. Emel'yanenko, Mikhail A. Varfolomeev, Sergey P. Verevkin, Katharina Stark, Karsten Müller, Michael Müller, Andreas Bösmann, Peter Wasserscheid, Wolfgang Arlt, *The Journal of Physical Chemistry C* 2015, 119 (47), 26381-26389.
- [67] Katharina Stark, Vladimir N. Emel'yanenko, Aleksandra A. Zhabina, Mikhail A. Varfolomeev, Sergey P. Verevkin, Karsten Müller, Wolfgang Arlt, *Industrial & Engineering Chemistry Research* 2015, 54 (32), 7953-7966.

- [68] Katharina Stark, Philipp Keil, Sebastian Schug, Karsten Müller, Peter Wasserscheid, Wolfgang Arlt, *Journal of Chemical & Engineering Data* 2016, 61 (4), 1441-1448.
- [69] M. Zenner, Teichmann, D., Pierro, M., Dungs, J., *ATZ Automobiltech* 2012, 12, 940-947.
- [70] Nicole Brückner, Katharina Obesser, Andreas Bösmann, Daniel Teichmann, Wolfgang Arlt, Jennifer Dungs, Peter Wasserscheid, *ChemSusChem* 2014, 7 (1), 229-235.
- [71] Wolfgang Arlt, Katharina Stark, Peter Wasserscheid, *Germany DE 102014116345 A1*, 10.11.2014, 2014.
- [72] Sasol, Marlotherm SH - Product information, 2014, http://www.sasolgermany.de/fileadmin/images/marlotherm/MARLOTHERM_SH_info_e_.pdf
- [73] G Do, P Preuster, R Aslam, A Bösmann, K Müller, W Arlt, P Wasserscheid, *Reaction Chemistry & Engineering* 2016, 1 (3), 313-320.
- [74] Rabya Aslam, Karsten Müller, Michael Müller, Marcus Koch, Peter Wasserscheid, Wolfgang Arlt, *Journal of Chemical & Engineering Data* 2015, 61 (1), 643-649.
- [75] Rabya Aslam, Karsten Müller, Wolfgang Arlt, *Journal of Chemical & Engineering Data* 2015, 60 (7), 1997-2002.
- [76] Karsten Müller, Rabya Aslam, Armin Fischer, Katharina Stark, Peter Wasserscheid, Wolfgang Arlt, *international journal of hydrogen energy* 2016, 41 (47), 22097-22103.
- [77] Rabya Aslam, Mirjana Minceva, Karsten Müller, Wolfgang Arlt, *Separation and Purification Technology* 2016, 163, 140-144.
- [78] Karsten Müller, Katharina Stark, Vladimir N. Emel'yanenko, Mikhail A. Varfolomeev, Dzmitry H. Zaitsau, Evgeni Shoifet, Christoph Schick, Sergey P. Verevkin, Wolfgang Arlt, *Industrial & Engineering Chemistry Research* 2015, 54 (32), 7967-7976.
- [79] Sasol, MARLOTHERM SH - EG-SICHERHEITSDATENBLATT, 2015,
- [80] Sasol, MARLOHC - EG-SICHERHEITSDATENBLATT, 2016,
- [81] Total S.A., Sicherheitsdatenblatt Dieselkraftstoff (gem. Verordnung(EG) Nr. 1907/2006, 2016,
- [82] Ludger Blum, Wilhelm A. Meulenberg, Heinz Nabielek, Robert Steinberger-Wilckens, *International Journal of Applied Ceramic Technology* 2005, 2 (6), 482-492.
- [83] Patrick Preuster, Peter Wasserscheid - Lehrstuhl für Chemische Reaktionstechnik - Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Persönliche Kommunikation, Kombination von SOFC und LOHC, 28.06.2017
- [84] Manfred Schuckert - Daimler AG, Persönliche Kommunikation, Gespräch über die Erwartungen an eine PEM-Brennstoffzelle im LKW, Erlangen-Eltersdorf - Meeting bei Hydrogenious Technologies GmbH, 22.3.2017
- [85] Markus Bachmeier, in *Präsentation bei Keyou GmbH*, Linde AG, Nordhausen 2017.
- [86] JET Tankstellen Deutschland GmbH, Persönliche Kommunikation, Daten einer konventionellen (durschnittlichen) Tankstelle, E-Mail, 2017
- [87] Deutz AG, Datenblatt - Deutz TCD 7.8 - Motor für industrielle Anwendungen, <http://www.straub-deutz.de/docs/Datenblatt%207.8.pdf>
- [88] Hydrogenics Corporation, Hydrogenics HYPM-HD 180 Power Module, 2016, <http://www.hydrogenics.com/wp-content/uploads/HyPM-180-SpecSheet.pdf>
- [89] André Fikrt, Richard Brehmer, Vito-Oronzo Milella, Karsten Müller, Andreas Bösmann, Patrick Preuster, Nicolas Alt, Eberhard Schlücker, Peter Wasserscheid, Wolfgang Arlt, *Applied Energy* 2017, 194, 1-8.

- [90] Michael Rinker - Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Persönliche Kommunikation, Einführung in Liquid Organic Hydrogen Carrier, 2017
- [91] Greenpeace Energy - Pressemitteilung, Meilenstein am Main - Greenpeace Energy und Stadt Hassfurt heben Windgas-Produktion auf ein neues Niveau Internetseite, online verfügbar: <https://www.greenpeace-energy.de/presse/artikel/greenpeace-energy-und-stadt-hassfurt-heben-windgas-produktion-auf-ein-neues-niveau.html>?
- [92] Vicente Franco, Oscar Delgado, Rachel Muncrief, The International Council on Clean Transportation, Heavy-Duty Vehicle Fuel-Efficiency Simulation: A Comparison of US and EU Tools, 2015, http://www.theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_GEM-VECTO-comparison_20150511.pdf
- [93] European Automobile Manufacturers Association, Internetseite, online verfügbar: <http://www.acea.be/>
- [94] Patrick Preuster, Christian Papp, Peter Wasserscheid, *Accounts of Chemical Research* 2017, 50 (1), 74-85.
- [95] Frank Zeitzen, Technische Daten und Messwerte - Vergleich MAN TGX 18.440 BLS, Euro 6, XLX und Mercedes Actros 1843 LS, Euro 6, Streamspace, Internetseite, online verfügbar:
http://www.eurotransport.de/test/1/9/5/1/3/8/6/Technische_Daten_und_Messwerte.pdf und
<http://www.eurotransport.de/test/test-man-tgx-18440-scania-vw-d20-d26-evvicent,-line-6508064.html>
- [96] 2G Cogeneration, Agenitor 408 - Technical specification - preliminary, 2013, <http://www.eko-star.eu/doc/2G-agenitor408.pdf>
- [97] Roger S. Pressmann Nick Howe, *Owning Model S: The Definitive Guide for Buying and Owning the Tesla Model S*. 2 ed., EVANNEX, Florida, 2016.
- [98] National Research Council, *Transitions to Alternative Vehicles and Fuels*, 2013, Washington DC,
- [99] Toyota, Mirai Product Information, 2016,
<http://toyotanews.pressroom.toyota.com/releases/2016+toyota+mirai+fuel+cell+product.download>
- [100] Interkorn GmbH - TruckSystems.de, LKW Tank Dieseltank MAN 400 I Aluminium, <https://www.trucksystems.de/LKW-Tank-Dieseltank-MAN-400-I-Alu>.
- [101] MAN Truck & Bus AG, Off-Road, Dieselmotoren für Land- und Umwelttechnik, Bau- und Sondermaschinen - Produktdaten MAN D2676, https://www.engines.man.eu/man/media/de/content_medien/doc/global_engines/off_road/offroad_agrar_151025.pdf
- [102] tm4, SUMO - Electric Powertrain Systems for Medium & Heavy-Duty Vehicles, <https://www.tm4.com/wp-content/uploads/2013/12/TM4-SUMO-Product-Brochure-web.pdf>



Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Arlt
Lehrstuhl für Thermische Verfahrenstechnik
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Egerlandstraße 3
91058 Erlangen
Tel: +49 9131 / 85 27 440

E-Mail: wolfgang.arlt@fau.de