

# Schlussbericht

(Nr. 3.2 BNBest-BMBF 98)

## Vorhabensbezeichnung

Machbarkeitsstudie - Wasserstoff und Speicherung im Schwerlastverkehr

Wolfgang Arlt

## **Förderkennzeichen**

03B108001

## **Zuwendungsempfänger**

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg  
Technische Fakultät – Department Chemie- und Bioingenieurwesen  
Lehrstuhl für Thermische Verfahrenstechnik

## **Laufzeit des Vorhabens**

1.2.2017 – 31.03.2018

## **Berichtszeitraum**

1.2.2017 – 31.03.2018

Autoren: Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Arlt, Dr. Jonas Obermeier, Lehrstuhl für Thermische  
Verfahrenstechnik, Universität Erlangen-Nürnberg, Egerlandstr. 3, 91058 Erlangen

Teile dieses Abschlussberichtes wurden aus dem veröffentlichten Bericht *Machbarkeitsstudie – Wasserstoff und Speicherung im Schwerlastverkehr* entnommen.

Dieser ist online unter [https://www.tvt.cbi.uni-erlangen.de/LOHC-LKW\\_Bericht\\_final.pdf](https://www.tvt.cbi.uni-erlangen.de/LOHC-LKW_Bericht_final.pdf) frei verfügbar.

## KURZFASSUNG

Die BMVI-Studie „Erneuerbare Energien im Verkehr - Potenziale und Entwicklungsperspektiven verschiedener erneuerbarer Energieträger und Energieverbrauch der Verkehrsträger“ gibt auch für diese zweite 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 CO<sub>2</sub>-Emissionen und dem Anteil erneuerbarer Energien am Energieverbrauch gemessen.“

Diese zweite Machbarkeitsstudie zeigt Wege auf, wie der Schwerlastverkehr CO<sub>2</sub>-frei gestaltet werden kann. Die Energiequelle ist dabei Wasserstoff, nicht jedoch als Gas, sondern in energiedichter, chemisch gebundener, bei Umgebungsbedingungen flüssiger Form (Liquid Organic Hydrogen Carrier, 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 Vorteile vor der Brennstoffzelle. Zudem konnten keine Indizien gefunden werden, dass Brennstoffzellen drastisch im Preis pro kW elektrischem Output sinken. Das gilt für PEM und SOFC Zellen.

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 Produktion regenerativer Energie für die emissionsfreie Mobilität in Deutschland genutzt werden.

Der nächste Schritt muss die Fertigung eines Prototypen LKW oder Bus sein, der dann auf der Straße getestet wird. Wie bei jeder neuen Technologie müssen gesetzliche Regeln verändert werden. Eine neue Technologie ist anfangs oft teurer als eine etablierte. Eine Lösung für einen Bus Prototypen wird präsentiert. 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 CO<sub>2</sub>-freie LKW zur Not bis auf Null.



## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Projekthintergrund</b>	<b>1</b>
1.1	<i>Aufgabenstellung</i>	1
1.2	<i>Ausgangssituation und Zielsetzung</i>	1
1.3	<i>Zusammenarbeit mit anderen Stellen</i>	3
1.4	<i>Planung und Ablauf des Vorhabens</i>	5
<b>2</b>	<b>Projektbearbeitung und –ergebnisse</b>	<b>6</b>
2.1	<i>Projektergebnisse</i>	6
2.1.1	<i>Erste Projektphase</i>	6
2.1.2	<i>Zweite Projektphase</i>	12
2.2	<i>Zusammenfassung der Ergebnisse</i>	14
2.3	<i>Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit</i>	16
2.4	<i>Nutzen der Projektergebnisse</i>	17
2.5	<i>Veröffentlichung der Projektergebnisse</i>	18
<b>3</b>	<b>Erfolgskontrollbericht</b>	<b>19</b>
3.1	<i>Beitrag des Ergebnisses zu den förderpolitischen Zielen</i>	19
3.2	<i>Wissenschaftlich-technische Ergebnisse des Vorhabens</i>	19
3.3	<i>Fortschreibung des Verwertungsplans</i>	20
3.4	<i>Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben</i>	21
3.5	<i>Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung</i>	21
	<b>Anhang</b>	<b>23</b>
1.	<i>Bericht H<sub>2</sub>-deNO<sub>x</sub> (Prof. Sven Kureti)</i>	23
2.	<i>Bericht Kaltstartfähigkeit/Dynamik (Prof. Michael Wensing)</i>	27
3.	<i>Bericht Direkt-LOHC-Brennstoffzelle (Prof. Peter Wasserscheid)</i>	34
4.	<i>Bericht SO-Brennstoffzelle</i>	37
5.	<i>Bericht Umsetzung der LOHC-Technologie in Bussen</i>	40
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>41</b>



# 1 Projekthintergrund

## 1.1 Aufgabenstellung

Die Kernaufgabe dieses Projektes war die Untersuchung der technologischen, ökonomischen und ökologischen Eignung der LOHC-Technologie (liquid organic hydrogen carrier, LOHC) für den Einsatz im Schwerlastverkehr. 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 Konzeptstudie über eine mögliche LOHC-Infrastruktur.

## 1.2 Ausgangssituation und Zielsetzung

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 Energieverbrauch und die zulässigen Treibhausgasemissionen der einzelnen Sektoren für das Jahr 2030 festgelegt. Im Falle des Verkehrssektors liegt dieser Zielwert bei 95 bis 98 Mio.  $t_{CO_2-Äq.}$  pro Jahr. Im Jahr 1990 betrug der Ausstoß, gemessen in  $CO_2$ -Äquivalenten, 163 Mio.  $t_{CO_2-Äq.}/a.$  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.  $t_{CO_2-Äq.}/a.$ ). 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 Klimaschutzziele der Bundesregierung nicht eingehalten werden können.

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.  $t_{CO_2-Äq.}$  für den Verkehrssektor angegeben. Dabei entfallen auf den Güterverkehr 44 und auf den Personenverkehr ca. 96 Mio.  $t_{CO_2-Äq.}$ . 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.  $t_{CO_2-Äq.}$  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].

Im Rahmen der Energiewende ist somit neben einem Umdenken im Strom- und Wärmesektor auch die Integration erneuerbarer Energien im straßengebundenen Mobilitätsbereich essentiell. Trotz zunehmender effizienzsteigernder und emissionsreduzierender Maßnahmen sind der absolute Energiebedarf sowie die Gesamtemissionen weiterhin durch einen stetigen Aufwärtstrend charakterisiert.

Nach aktuellem Stand werden ca. 95% der Nutzfahrzeuge mit Dieselaggregaten betrieben [5]. Erneuerbare Energien können auf drei Wegen Einzug in den Mobilitätssektor halten: a. Elektrische Energie, b. Synthetische Kraftstoffe, c. Wasserstoff. Die direkte Nutzung von Strom bzw. die Speicher-/Antriebs Einheit aus Akkumulator/Elektromotor weist grundsätzlich eine hohe Effizienz auf. Allerdings ist die Speichermenge der elektrischen Energie zum aktuellen Zeitpunkt nicht ausreichend, insbesondere im Kontext der im Güterfernverkehr geforderten Reichweite. Für den Verteilverkehr kann das anders sein.

Die Herstellung synthetischer Treibstoffe wie Methan, Methanol oder Fischer-Tropsch-Produkte (Diesel, Benzin) wird seit einigen Jahren als vielversprechende Möglichkeit zur Speicherung erneuerbarer Energien diskutiert (Power to Gas, Power to Liquid). Ein wesentlicher Vorteil ist, dass keine grundlegenden technologischen Entwicklungen im Bereich der Antriebskonzepte notwendig sind, da bisherige Verbrennungsmaschinen durch leichte Modifikationen weiterhin zum Einsatz kommen können. Allen Syntheseverfahren ist jedoch gemein, dass sie durch das Ausgangsstoffgemisch, bestehend aus CO/CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub> (Synthesegas), charakterisiert sind. Die Herstellung von regenerativem Wasserstoff erfolgt nach aktuellem Stand der Technik mithilfe eines Elektrolyseurs, gekoppelt mit Photovoltaikzellen oder Windkraftanlagen. Dieser Weg ist durch geringe thermodynamische Effizienz [6] und hohe Prozesskomplexität [7] gekennzeichnet. Zudem bleiben die aus der Verbrennung fossiler Kraftstoffe bekannten Emissionsprobleme bestehen.

Bei der direkten Nutzung regenerativ erzeugten Wasserstoffs (hier wird allein die Niedertemperatur-Elektrolyse betrachtet) als Kraftstoff in einem Schwerlasttransporter können die obigen Problemstellungen umgangen werden. Dabei kann der Antrieb sowohl über eine Brennstoffzelle als auch über einen Wasserstoffverbrennungsmotor erfolgen.

Größte Herausforderung ist die Speicherung des Wasserstoffs. Aufgrund der geringen volumetrischen Speicherdichte von Wasserstoff sind dabei entweder ein extrem hoher Druck, sehr tiefe Temperaturen oder eine physikalisch bzw. chemische Bindung des Wasserstoffs notwendig. Dabei kommt, nach aktuellem Stand der Wissenschaft, insbesondere der Speicherung von Wasserstoff in flüssigen organischen Trägermedien (LOHC) große Bedeutung zu, wo man bei Umgebungsbedingungen zu Speichervolumina kommt, die zu Druckwasserstoff bei > 1000 bar äquivalent sind. Im Speziellen wird hierbei ein Paar aus flüssigen organischen Trägern durch katalytische Hydrierung und Dehydrierung zyklisch ineinander konvertiert und dabei reversibel Wasserstoff aufgenommen bzw. vollständig abgegeben. Eine wichtige Eigenschaft dieser Systeme ist, dass die Wasserstoff-reiche Komponente einfach und sicher (Träger nicht toxisch und nicht brennbar) gelagert und mit Hilfe existierender Infrastrukturen transportiert werden kann. Durch Initiierung der



endothermen katalytischen Dehydrierung wird der Wasserstoff freigesetzt und die Wasserstoff-arme Komponente rückgebildet (Kreislaufprozess). Die Wasserstoff-arme Komponente kehrt an den Ort verfügbarer Energie zurück. Beide Komponenten verbrauchen sich nicht. Der Kreisprozess ist durch identische Wärme-aufnahme und -abgabe gekennzeichnet. Er wird umso effektiver, je besser die Wärmeintegration gelingt.

Basierend auf dieser Ausgangssituation lassen sich die grundlegenden Zielsetzungen für dieses Projekt formulieren:

- » Erfassung des Ist-Zustandes des Schwerlastverkehrs
- » Skizzierung eines LOHC-basierten Antriebsstrangs und Gegenüberstellung denkbarer Varianten
- » Skizzierung einer LOHC Infrastruktur und Gegenüberstellung der denkbaren Varianten
- » Erfassung des Ist-Zustandes aller involvierten fahrzeugseitigen und infrastrukturellen Komponenten
- » Identifizierung des Handlungsbedarfs
- » Gegenüberstellung eines LOHC-basierten Antriebsstrangs mit alternativen Konzepten (fossil und regenerativ)

### 1.3 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Projekt wurde von vier Forschungseinrichtungen bearbeitet, wobei der Lehrstuhl für Thermische Verfahrenstechnik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU) federführend agiert hat. Im Folgenden werden die Aufgabenbereiche der beteiligten Partner aufgeführt:

- » **Lehrstuhl für Thermische Verfahrenstechnik / FAU**
  - Feststellung des Ist-Zustandes des Schwerlastverkehrs
  - Skizzierung von LOHC-basierten Antriebskonzepten
  - Energiebilanzierung einer LOHC-Antriebseinheit und Gegenüberstellung mit alternativen Konzepten
  - Skizzierung von potenziellen Szenarien einer LOHC-Infrastruktur
  - Nutzung einer SOFC
  - Organisation und Durchführung von öffentlichen Workshops
  - Akquise der universitären und industriellen Kooperationspartner für weiterführende Arbeiten
  - Projektkoordinierung und Zusammentragen aller Ergebnisse im Rahmen einer Machbarkeitsstudie (siehe Veröffentlichungen)
- » **Lehrstuhl für Technische Thermodynamik / FAU**
  - Aufbau einer fahrzyklenbasierten Simulation
  - Ermittlung der Leistungscharakteristik eines spezifizierten LKWs (40 t)
  - Dimensionierung eines Pufferspeichers zur Abbildung der Dynamik sowie der Kaltstartfähigkeit
  - Abschätzung der Dimension (grav. und vol.) des Antriebsstrangs
  - Gegenüberstellung der LOHC-basierten Antriebseinheit mit alternativen (regenerativen und konventionellen) Konzepten
- » **Lehrstuhl für Chemische Reaktionstechnik / FAU**
  - Miniaturisierung der Freisetzung
  - Neues Konzept zur Versorgung von Brennstoffzellen ohne Freisetzung (Direkt-LOHC-Zelle)
- » **Professur Reaktionstechnik / Technische Universität Bergakademie Freiberg**

- Untersuchung der selektiven NO<sub>x</sub>-Reduktion mittels H<sub>2</sub> in mageren Abgasen von Wasserstoffverbrennungsmotoren
- Entwicklung eines Katalysators und Optimierung des Edelmetallgehalts (Herausforderung: Vermeidung von N<sub>2</sub>O)
- Entwicklung und experimentelle Charakterisierung eines wabenförmigen H<sub>2</sub>-deNO<sub>x</sub>-Katalysators mit LKW-gängigen Dimensionen des Entstickungsstrangs

Neben den obigen Projektpartnern wurden im Rahmen dieses Projektes eine Vielzahl an Kontakten zu Forschungsinstituten und Firmen geknüpft.

- » **Adapt-engineering GmbH & Co. KG**, Nordhausen
- » **Atrex Energy**, Walpole, MA, USA
- » **Audi AG**, Ingolstadt
- » **AVL-List GmbH**, Graz
- » **Brose Fahrzeugteile GmbH & Co. KG**, Coburg
- » **Bundesverband Güterkraftverkehr Logistik und Entsorgung (BGL) e.V.**, Frankfurt am Main
- » **Daimler AG**, Stuttgart
- » **Evopro Group**, Budapest
- » **ELAFLEX HIBY Tanktechnik GmbH & Co. KG**, Hamburg
- » **Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg**  
(Lehrstuhl für Chemische Reaktionstechnik & Lehrstuhl für Technische Thermodynamik), Erlangen
- » **Fuel Cell Energy Inc.**, Danbury, CT 06810, USA
- » **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
- » **National Science Foundation**, Pittsburgh, PA, USA
- » **NOW GmbH**, Berlin
- » **Phillips 66 Continental Holding GmbH**, Hamburg
- » **Physikalisch-Technische Bundesanstalt**, Braunschweig
- » **Projekträger Jülich**, Berlin
- » **Schaeffler AG**, Herzogenaurach
- » **Scheidt & Bachmann GmbH**, Mönchengladbach

- » **Siemens AG**, München
- » **Schmidt & Haensch GmbH & Co.**, Berlin
- » **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
- » **Watt Fuel Cell**, Mount Pleasant, PA, USA
- » **WIND-WASSERSTOFF-Projekt GmbH & Co. KG**, Börgerende
- » **WINGAS GmbH**, Kassel

## 1.4 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Laufzeit des Projektes war zunächst auf sechs Monate beschränkt (01.02.-31.07.2017). Im Oktober wurde das Projekt jedoch rückwirkend (Aufstockung) auf eine Gesamtlaufzeit von elf Monaten verlängert. Aufgrund der späten Zusendung des zweiten Zuwendungsbescheids wurde eine kostenneutrale Verlängerung bis schließlich 31.3.2018 genehmigt. Als Zeitspanne für die Projektbearbeitung ist somit 1.02.-31.03.2018 anzugeben.

Die Arbeiten aus der ersten Projektphase gliedern sich in sechs Arbeitspakete (working points, WP):

- » WP1: Feststellung des Ist-Zustandes des Schwerlastverkehrs
- » WP2: Skizzierung von Antriebskonzepten und Bewertung des Ist-Zustandes der beteiligten Komponenten
- » WP3: Vergleich des Emissionsverhaltens von PEM-Brennstoffzelle und H<sub>2</sub>-Verbrennungsmotor
- » WP4: Energiebilanzierung der potenziellen Antriebskonzepte
- » WP5: Skizzierung der LOHC-Infrastruktur und Bewertung des Realisierungspotenzials
- » WP6: Bildung eines Projektkonsortiums und Antragstellung für ein Folgeprojekt

In dieser ersten Projektphase wurden Einzelaspekte identifiziert, die weitere Untersuchungen notwendig machten. Diese Themen wurden im Aufstockungsantrag adressiert und schließlich vier Arbeitsgruppen (AG) für die zweite Projektphase gebildet:

- » AG1: LOHC-LKW mit Verbrennungsmotor (Aspekte: Freisetzer, Dynamik/Kaltstart, deNO<sub>x</sub>)
- » AG2: LOHC-LKW mit Brennstoffzelle (Aspekte: LOHC-Direktbrennstoffzelle, SOFC)
- » AG3: LOHC-BUS (Fast-Track)
- » AG4: Rechtliche Rahmenbedingungen

## 2 Projektbearbeitung und –ergebnisse

### 2.1 Projektergebnisse

Im Folgenden wird kurz für jedes Arbeitspaket/jede Arbeitsgruppe (siehe Kapitel 1.4) eine Zusammenfassung der durchgeführten Arbeiten gelistet und die wichtigsten Ergebnisse hervorgehoben. Ein separater Bericht ist verfügbar.

#### 2.1.1 Erste Projektphase

##### WP1: Feststellung des Ist-Zustandes des Schwerlastverkehrs

- » Einordnung des Handlungsbedarfs gemäß statistisch erfasster Datensätze (Energiebedarf, Transportleistung, Emissionen, eingesetzte Kraftstoffe, Fahrprofile etc.)

- Straßengebundener Güterfernverkehr gewinnt entscheidend an Bedeutung
- 99,9 % der schweren-LKWs (>12 t Ntzl.) und Sattelzugmaschinen sind dieselbetrieben

- » Analyse der (dieselbetriebenen) Fern-LKW-Flotte hinsichtlich Reichweite, mitgeführter Energiemenge, Durchschnittsalter, Tankstelleninfrastruktur etc.

- Hohe Energiedichte von Diesel sorgt für enorme Reichweiten (>4.000 km, Transportleistung > 45.000 tkm)
- Sehr geringes Durchschnittsalter der LKWs ermöglicht schnellen Flottenaustausch (Sattelzugmaschine 3,8 Jahre (2009), LKW 7,9 Jahre (2017))
- 14.531 Tankstellen in Deutschland (Stand 2015)
- Dieselförderung mit mind. 90 L/min sorgt für eine max. Tankzeit von 16 Min. (1.500 L<sub>Diesel</sub>)

- » Festlegung einer Leistungsklasse und den Rahmenbedingungen des zu untersuchenden LKW-Typs in Rücksprache mit Vertretern führender Automobilkonzerne

- Geforderte Mindestreichweite: 800 km
- Maximale Dimension des Antriebsstrangs: 4.000 kg und 4 m<sup>3</sup>
- Leistungsanforderung 110/120 kW<sub>mech</sub> (Ebene) bis 320/360 kW<sub>mech</sub> (Volllast)

- » Ökonomische und energetische Gegenüberstellung regenerativer Antriebskonzepte und Herausarbeitung des Potenzials der Wasserstoffnutzung im Güterfernverkehr

- Synthese von regenerativen Kraftstoffen setzt hochwertigen Wasserstoff zu energetisch und ökonomisch niederwertigen Produkten um (bspw. Methan, Methanol, Dimethylether oder Diesel-/Benzin-Substituenten)
- Business Case synthetischer Kraftstoffe fragwürdig
- Direkte Wasserstoffnutzung energetisch vorteilhaft
- Herausforderung: Speicherung von Wasserstoff

## WP2: Skizzierung von Antriebskonzepten und Bewertung des Ist-Zustandes der beteiligten Komponenten

- » Skizzierung des Grundkonzeptes eines LOHC-basierten Antriebsstrangs mit on-board  $H_2$ -Freisetzung und Beschreibung der wesentlichen Komponenten

- Mehrkammer- oder Blasketank notwendig um LOHC-Tankvolumen zu reduzieren
- Als  $H_2$ -Freisetzungseinheit werden der Dehydrierreaktor, die Begleitheizung, Komponenten für die Wärmerückgewinnung sowie Apparaturen für die Wasserstoffreinigung zusammengefasst
- Einheit zur Wandlung von Wasserstoff in Antriebsenergie kann ein Wasserstoffverbrennungsmotor oder eine Brennstoffzelle sein
- Eine Einheit zur Abbildung der Dynamik sollte aufgrund der (möglichen) Trägheit der  $H_2$ -Freisetzung einbezogen werden (im Fall einer Brennstoffzelle: Batterie; im Fall eines Wasserstoffverbrennungsmotors:  $H_2$ -Pufferspeicher)

- » Definition der Anforderungen an den Antriebsstrang für eine erste Bilanzierung

- Spitzenlast  $360 \text{ kW}_{\text{mech}}$
- Durchschnittsleistung  $120 \text{ kW}_{\text{mech}}$
- Mittlere Antriebsenergiemenge  $130 \text{ kWh}_{\text{mech}}/100 \text{ km}$
- Leistungspuffer  $180 \text{ kW}_{\text{mech}}$  (50% der Spitzenlast) mit einer Kapazität von  $90 \text{ kWh}_{\text{mech}}$
- Maximales Tankvolumen 1.500 L (das verwendete LOHC ist kein Gefahrstoff, damit ist das Tankvolumen unbegrenzt)
- Minimale Reichweite 800 km

- » Definition der Rahmenbedingungen der  $H_2$ -Freisetzungseinheit in Rücksprache mit dem Lehrstuhl für Chemische Reaktionstechnik (FAU)

- Temperatur der Dehydrierung  $320 \text{ }^\circ\text{C}$
- Druck der Dehydrierung 0-4 bar
- Dehydrierhub 90 %
- Energiebedarf der  $H_2$ -Freisetzung  $12 \text{ kWh}_{\text{th}}/\text{kg}_{H_2}$ , setzt sich aus  $9 \text{ kWh}_{\text{th}}/\text{kg}_{H_2}$  für die Reaktionswärme und  $3 \text{ kWh}_{\text{th}}/\text{kg}_{H_2}$  für das Vorwärmen des beladenen LOHCs zusammen
- Szenarien für die Wärmebereitstellung:
  1. Abwärmenutzung deckt Energiebedarf vollständig (best case)
  2. Verbrennung eines Teils des freigesetzten Wasserstoffs (worst case)
  3. Mitführen eines zweiten Kraftstoffs (Biodiesel) und Verbrennung (Dual-Fuel)

- » Detaillierte Betrachtung eines LOHC-Antriebsstrangs in Kombination mit einem Wasserstoffverbrennungsmotor (keine Simulation, keine Wärmeintegration modelliert)

- Geforderter Injektionsdruck ( $>10 \text{ bar}$ ) übersteigt Wasserstoffdruck nach Dehydrierung
- $H_2$ -Pufferspeicher zur Abbildung der Dynamik und der Kaltstartfähigkeit notwendig
- Bauvolumen des Pufferspeichers korreliert stark mit dem Speicherdruck (Kompression zwingend notwendig)
- Stickoxidbildung anzunehmen, allerdings Reduzierung von  $\text{NO}_x$  mit  $H_2$  bei tiefen Temperaturen denkbar

- Keine (wesentlichen) Anforderungen an die Reinheit des freigesetzten Wasserstoffs
  - Überschlägige Bilanzierung: worst case // best case
    - spez. LOHC Bedarf pro 100 km: 288  $L_{LOHC+}$  // 181  $L_{LOHC+}$
    - Reichweite: 520 km // 830 km
- » Detaillierte Betrachtung eines LOHC-Antriebsstrangs in Kombination mit einer Brennstoffzelle (keine Simulation, keine Wärmeintegration modelliert)
- Grundsätzlich PEM und SOFC denkbar (SOFC erst in der zweiten Projektphase berücksichtigt)
  - Batterie als Pufferspeicher zur Abbildung der Dynamik und der Kaltstartfähigkeit notwendig
  - Bauvolumen des Pufferspeichers resultiert aus Energiespeicherdichte der Batterie und geforderter Kapazität
  - Zero-Emission, also keine Stickoxidproblematik
  - Brennstoffzelle hat konkrete Anforderungen an die Reinheit des freigesetzten Wasserstoffs
  - Überschlägige Bilanzierung: worst case // best case
    - spez. LOHC Bedarf pro 100 km: 244  $L_{LOHC+}$  // 154  $L_{LOHC+}$
    - Reichweite: 615 km // 974 km
- » Formulierung des aktuellen Stands der Komponenten und der anstehenden Entwicklungsschritte

### WP3: Vergleich des Emissionsverhaltens von PEM-Brennstoffzelle und H<sub>2</sub>-Verbrennungsmotor

- » Herausforderung: Stickoxide in Szenario Wasserstoffverbrennungsmotor müssen unter Nachweißgrenze liegen
- » Untersuchung der selektiven NO<sub>x</sub>-Reduktion mittels H<sub>2</sub> in mageren Abgasen
- » Charakterisierung unterschiedlicher Katalysatoren auf Basis von Platin und/oder Palladium (auf Wolfram-Zirkoniumoxid-Trägern) hinsichtlich Aktivität und Selektivität
- Grundlegend: zwei vielversprechende Katalysatoren identifiziert, aktueller Stand:
    - Pt/WO<sub>3</sub>/ZrO<sub>2</sub> schnellere Kinetik als Pd/WO<sub>3</sub>/ZrO<sub>2</sub>
    - Pd/WO<sub>3</sub>/ZrO<sub>2</sub> höhere Selektivität als Pt/WO<sub>3</sub>/ZrO<sub>2</sub> (weniger N<sub>2</sub>O)
- » Beschichtung eines konventionellen Katalysatorträgers (Cordierit-Wabenstruktur) mit identifizierten, vielversprechenden Katalysatoren
- » Experimentelle Untersuchung des H<sub>2</sub>-deNO<sub>x</sub>-Katalysators
- Abgasreinigung eines Wasserstoffverbrennungsmotors (350 kW, saubere Verbrennung, NO<sub>x</sub>-Rohemissionen < 50 ppm) mit H<sub>2</sub>-Anteilen von 2.000 ppm nach dem Motor bis unter Nachweisgrenze möglich
  - Motor mit 350 kW und
    - Teillast:
      - Abgasstrom 236 m<sup>3</sup>/h, Wasserstoffmenge 39 g<sub>H<sub>2</sub></sub>/h, LOHC-Menge 0,7  $L_{LOHC+}$ /h
    - Volllast:
      - Abgasstrom 1260 m<sup>3</sup>/h, Wasserstoffmenge 210 g<sub>H<sub>2</sub></sub>/h, LOHC-Menge 4,1  $L_{LOHC+}$ /h
  - Fazit: Bezogen auf die für den Antrieb des LKWs notwendige Menge an LOHC sind diese LOHC-Volumenströme (verschwindend) gering

#### WP4: Energiebilanzierung der potenziellen Antriebskonzepte

- » Erstellung eines modularen Tools zur statischen Energiebilanzierung des LOHC-Konzeptes
  - Berücksichtigung der Abhängigkeit der Stoffdaten von den Parametern Temperatur, Druck und Hydriergrad
  - Numerisches Lösen der Massen- und Energiebilanz
  - Szenarien-abhängige Ausgabe der Prozess-Effizienz
- » Erstellung einer fahrzyklenbasierten Simulation eines 40 t LKWs (Rahmenbedingungen siehe WP1 + WP2)
  - Abbildung unterschiedlicher Antriebssysteme (Batterieelektrisch, Batterieelektrisch + Rekuperation, Diesel, Druckwasserstoff + Wasserstoffverbrennungsmotor, Druckwasserstoff + PEM-Brennstoffzelle, LOHC + Wasserstoffverbrennungsmotor, LOHC + PEM-Brennstoffzelle)
  - Ermittlung der Leistungsabfrage im Fahrzyklus (ACEA Long Haul Cycle) unter Berücksichtigung der Wärmeintegration (Abwärmenutzung Motor)
    - Brennstoffzelle hat höheren Wirkungsgrad als Wasserstoffverbrennungsmotor
    - Wärmerückgewinnung aus Abgasen des Verbrennungsmotors zur Teildeckung der Dehydrierwärme möglich
    - PEM-Brennstoffzelle kann keine (nutzbare) Abwärme liefern, so dass der Energiebedarf der Freisetzungseinheit vollständig über den H<sub>2</sub>-Brenner zur Verfügung gestellt werden muss
    - Gesamteffizienz von „Freisetzungseinheit und Verbrennungsmotor“ höher als von „Freisetzungseinheit und Brennstoffzelle“ (durch Wärmeintegration)
    - Geringe Leistungsanforderung an die Freisetzungseinheit sowie geringerer LOHC-„Verbrauch“ im Konzept mit Wasserstoffverbrennungsmotor
  - Leistungspuffer bei LOHC-basierten Systemen als „Black-Box“ (erst in der zweiten Projektphase konkretisiert)
  - Dimensionierung der Freisetzungseinheit gemäß der Leistungsabfrage anhand einer Korrelation aus Kinetik-Verweilzeit-Reaktionsvolumen
  - Ermittlung der Dimension (gravimetrisch und volumetrisch) aller Betrachteten Antriebsstränge und Gegenüberstellung der Ergebnisse für eine Reichweite aller Fahrzeuge von 800 km
    - Dieselantrieb außer Konkurrenz hinsichtlich der Dimension des Antriebsstrangs
    - Batterieelektrischer Antrieb ist (nach aktuellem Stand) zu schwer/zu groß
    - Druckwasserstoff-Konzepte erzielen vergleichbare Ergebnisse wie LOHC-basierte Lösungen
    - LOHC-basierte Antriebsstränge überschreiten die von den Automobilherstellern geforderten Grenzen (4 m<sup>3</sup> und 4 t) nur knapp (bei aktuellem Stand der Reaktortechnologie, deutliche Verbesserung möglich)
    - Volumen/Gewicht der Freisetzungseinheit nicht entscheidend, sondern LOHC als Energieträger macht den Hauptteil des Volumens/Gewichts aus

### WP5: Skizzierung der LOHC-Infrastruktur und Bewertung des Realisierungspotenzials

- » Definition der Rahmenbedingungen die eine LOHC-Infrastruktur erfüllen muss
- » Entwurf der LOHC-Infrastruktur mit einer zentralen und einer dezentralen Wasserstoffbereitstellung und Gegenüberstellung

- Zentrale Wasserstoffbereitstellung
  - Kapazitätsmethode chemischer Anlagen senkt Kosten
  - Hoher Transportaufwand (LOHC)
- Dezentrale Wasserstoffbereitstellung
  - LOHC wird am Ort der Wasserstoffherzeugung hydriert
  - Platzbedarf und Anbindung jeder Tankstelle an ein Hochspannungsnetz zum Betrieb des Elektrolyseurs ist kritisch zu hinterfragen

- » Detaillierte Betrachtung der Vorgänge an einer LOHC-Tankstelle

- Bezug von LOHC<sup>+</sup> und Rückführung von LOHC<sup>-</sup> über eine zweiflutige Zapfpistole wünschenswert und möglich (Reduzierung der Tankzeit)
- Messung des Hydriergrades essentiell für die Abrechnung (über ein Prozessrefraktometer in der Pilotanlage bereits realisiert)
- Lagerung von LOHC in konventionellen (Mehrkammer-)Kraftstofftanks an der Tankstelle ohne wesentliche Einschränkungen denkbar

- » Formulierung grundlegender Gedankengänge zur Einführung eines LOHC-Pfandsystems sowie der gesetzlichen Rahmenbedingungen

- LOHC ist nicht der Kraftstoff, sondern nur ein Träger des eigentlichen Kraftstoffs Wasserstoff
- Abrechnung des „Energieträgers LOHC“ nicht vergleichbar mit existierenden Kraftstoffen
- EEG Umlage für Betreiber der Elektrolyseure unzumutbar

- » Formulierung des aktuellen Stands der Komponenten und der anstehenden Entwicklungsschritte

### WP6: Bildung eines Projektkonsortiums und Antragstellung für ein Folgeprojekt

- » Organisation themenspezifischer Workshops
  - Workshop „LOHC Infrastruktur“ (20.06.2017, 18 Teilnehmer)

#### Teilnehmende Firmen und Institute

- 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
- Workshop „H<sub>2</sub>-Verbrennungsmotor“ (3.7.2017, 18 Teilnehmer)
  - Teilnehmende Firmen und Institute**
  - 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
- Workshop „Miniaturisierung und H<sub>2</sub>-deNO<sub>x</sub>“ (6.7.2017, 14 Teilnehmer)
  - Teilnehmende Firmen und Institute**
  - 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
- » Organisation eines öffentlichen Workshops am Energie Campus Nürnberg (15.9.2017, 36 Teilnehmer)
  - Teilnehmende Firmen und Institute**
  - AREVA GmbH, Erlangen
  - Audi AG, Ingolstadt
  - Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
  - Fraunhofer IISB, Erlangen
  - Hydrogenious Technologies GmbH, Erlangen
  - Institut ELSYS, TH Nürnberg, Nürnberg
  - JET Tankstellen Deutschland GmbH, Hamburg
  - Karlsruher Institut für Technologie (Institut für Mikroverfahrenstechnik), Karlsruhe
  - Keyou GmbH, München
  - MAN Truck & Bus AG, Nürnberg
  - NOW GmbH, Berlin
  - Projektträger Jülich, Berlin
  - Schaeffler Technologies AG & Co. KG
  - Schmidt & Hänsch GmbH & Co., Berlin
  - Schrader-T+A Fahrzeugbau GmbH & Co. KG, Beckum
  - Stadtwerke Haßfurt
  - Technische Universität Bergakademie Freiberg (Institut für Energieverfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen), Freiberg

## 2.1.2 Zweite Projektphase

### AG1: LOHC-LKW mit Verbrennungsmotor (Aspekte: Freisetzer, Dynamik/Kaltstart, deNO<sub>x</sub>)

- » Reaktorkonzept (siehe Anhang 3)
  - Transferhydrierung
    - Die hohe Freisetzungstemperatur und die benötigte Wärmemenge wurden als nachteilig empfunden, daher 2 neue Reaktorkonzepte
    - Transferhydrierung bei Temperaturen bis 190°C im Labor gelungen
- » Dynamik/Kaltstart (siehe Anhang 2)
  - Bestimmung der Größe eines Zwischenspeichers, um einen Kaltstart zu ermöglichen
  - Fahrzeug Sattelzug 40 t, 8 Zylinder Motor, 374 kW
  - Aufheizphase mit 700 s sehr schnell, kein Einfluss der Motorleistung und Fahrstrecke
  - Außentemperatur unwesentlich
  - Bei einer Systemrestwärme von 200°C ist das System sofort startfähig
  - Wasserstoffpuffer größer 2,3 kg H<sub>2</sub>
- » Stickoxid-Reduzierung mit H<sub>2</sub> – Charakterisierung von Katalysatoren (siehe Anhang 1)
  - Charakterisierung der Katalysatoren hinsichtlich maximalem NO<sub>x</sub>-Umsatz, Temperatur am NO<sub>x</sub>-Umsatz, integraler NO<sub>x</sub>-Umsatz
    - Variation des H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>-Verhältnisses
    - Variation des Edelmetallanteils im Katalysator
    - Variation des Pt/Pd-Verhältnisses im Katalysator
  - Maximale H<sub>2</sub>-Selektivität an Pd-Katalysatoren ist 15% bei 6% O<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>-Gehalt von 2000 ppm
  - Bei Pt/Pd-Mischkatalysatoren ist Abwägung zwischen Stickstoffselektivität und NO<sub>x</sub> Umsatz zu treffen: mit Platin ist ein höherer NO<sub>x</sub>-Umsatz von bis zu 99% mit 63% N<sub>2</sub>-Selektivität zu erzielen, mit Palladium ist die N<sub>2</sub>-Selektivität auf bis zu 86% bei einem maximalen NO<sub>x</sub>-Umsatz von 59% erzielbar

### AG2: LOHC-LKW mit Brennstoffzelle (Aspekte: LOHC-Direktbrennstoffzelle, SOFC)

- » LOHC-Direktbrennstoffzelle (siehe Anhang 3)
  - Direkt-PEMFC
    - Die hohe Freisetzungstemperatur und die benötigte Wärmemenge wurden als nachteilig empfunden, daher 2 neue Reaktorkonzepte
    - Spezielle PEMFC im Rahmen dieses Projektes beschafft und im Labor mit dem Ersatzstoff 2-Propanol in Betrieb genommen; Konzept wurde bestätigt
- » SOFC ZUSAMMENFASSUNG (siehe Anhang 4)
  - Die Entwicklung eines Nissan Vans mit einer SOFC war der Anstoß für dieses Kapitel; eine SOFC kann die benötigte Freisetzungswärme bei der richtigen Temperatur liefern; SOFC werden heute genutzt, wenn der Brennstoff nicht Wasserstoff ist
  - Es wurde keine ingenieurtechnische Evidenz gefunden, dass der Preis von 3000 USD/kW Antriebsleistung durch große Produktmengen wesentlich fallen wird

- Die Herstellung von SOFC heute schon automatisiert
- Ein Hersteller produziert 50 MW pro anno
- Ein Verbrennungsmotor mit Diesel hat Kosten von 50€/kW Antriebsleistung und ist damit im Moment unschlagbar; Kosten eines H<sub>2</sub>-Verbrennungsmotors sollten diesen Wert irgendwann erreichen. Das Nebenprodukt NO<sub>x</sub> kann wirkungsvoll mit H<sub>2</sub> entfernt werden.

### AG3: LOHC-BUS (Fast-Track)

- » Ermittlung der Eck-Daten eines MAN-Wasserstoffbusses (8 Jahre im öffentlichen Personennahverkehr in Berlin im Einsatz) [8]

- Modelbezeichnung: MAN-Niederflur Lion's City, Leistung 150 kW, Transportkapazität > 80 Personen
- Aktuelles Tanksystem: 10-Behältersystem mit 10x205 L zur Speicherung von 45 kg Wasserstoff bei 350 bar
- H<sub>2</sub>-Verbrauch: 20-24 kg<sub>H<sub>2</sub></sub>/100 km

- » Bilanzierung der mittleren Leistungsanforderung sowie H<sub>2</sub>-Verbrauchswerte und Übertragung auf einen LOHC-basierten Antriebsstrang zur Dimensionierung der Freisetzungseinheit

- 45 kg<sub>H<sub>2</sub></sub> entsprechen 875 L<sub>LOHC+</sub> bei 90% Hydrierhub, pro 100 km müssen 390...465 L<sub>LOHC+</sub> dehydriert werden
- Für 150 kW<sub>mech</sub> benötigt H<sub>2</sub>-Verbrennungsmotor ca. 17...21 kg<sub>H<sub>2</sub></sub>/h (580...710 kW<sub>H<sub>2</sub></sub>)
- Freisetzer muss 21...26 kg<sub>H<sub>2</sub></sub>/h liefern (20% für H<sub>2</sub>-Brenner), laut Kinetikmessung (kommerzieller Katalysator) ergeben sich 520...650 L<sub>Reaktion</sub> Reaktionsvolumen
- Gesamtvolumen der LOHC Einheit: 875 L<sub>LOHC+</sub> + 1200 L<sub>Freisetzer</sub> (Stand heute!) (Vergleiche 2050 L Druckwasserstofftank)

- » Initiierung einer Arbeitsgruppe für einen LOHC-Bus

- Deutsche Firmen wenig interessiert
- Ein Interessent in Ungarn (Fa. Evopro), der bisher die Ikarus Busse produziert
- Plan: Umbau eines vorhandenen Elektrobusses
- Ein Hindernis ist die Förderung einer deutsch-ungarischen Kooperation

### AG4: Rechtliche Rahmenbedingungen

- » Herausarbeitung der Besonderheiten der Energiemengenmessung in Verbindung mit dem LOHC-Konzept

- Energiemengenmessung muss an der Tankstelle und/oder allgemein bei dem Bezug/der Rückgabe von LOHC erfolgen
- Energiemengenmessung über Masse und Hydriergrad bzw. Volumen+Temperatur und Hydriergrad

- » Klärung der Zuständigkeiten für die Zulassung von neuen Kraftstoffen/Energiestoffen

- » Organisation eines gemeinsamen Treffens mit der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) und der Firma Schmidt+Haensch GmbH Co. (Hersteller Refraktometer) in Berlin zur Festlegung der Arbeitspakete und Fragestellungen für die Zulassung von LOHCs als Energieträger

- PTB muss sowohl den Hydriergrad der Proben als auch den Brechungsindex bestimmen um eine (eigene) Korrelation zu erstellen
- Unter der Annahme einer zulässigen fehlerhaften Energiemengenmessung von 3% und einer Differenz der Brechungsindizes von LOHC<sup>-</sup> und LOHC<sup>+</sup> von 0,1 (Messungen TVT) müsste der Brechungsindex auf mind.  $10^{-4}$  genau gemessen werden – dies ist eine essentielle Erkenntnis, stellt messtechnisch laut Schmidt&Haensch jedoch kein Problem dar
- Ungeklärte Fragestellungen:
  - wie groß sind die Unterschiede im Brechungsindex von einer Reinstoff-Mischung aus H0 und H18-DBT und einer (freien) Mischung mit identischem Hydriergrad
  - Welchen Einfluss haben (potenzielle) Crack-Produkte auf den Hydriergrad und damit auf die Energiemengenmessung?
- Die Zulassungsabteilung der PTB sollte frühzeitig beratend in die Untersuchungen/Besprechungen hinzugezogen werden
- Schmidt&Haensch kann Prozessrefraktometer liefern und war bereits mit Zapfsäulenherstellern (Gilbarco) in Kontakt – zudem hat Schmidt&Haensch bereits eine Kooperation mit der Hydrogenious Technologies GmbH

- » Versenden von LOHC-Proben unterschiedlicher Hydriergrade an die PTB um erste Untersuchungen mit der verfügbaren Messtechnik zu initiieren
- » Alle identifizierten Partner (Tankstellenbetreiber, Zapfsäulenhersteller, Zapfpistolenhersteller, Messtechnik-Hersteller sowie die PTB) sind bereit für die Entwicklung einer eichfähigen LOHC-Zapfsäule und haben in enger Kooperation und Rücksprache bereits Zeit- und Kostenpläne aufgestellt

## 2.2 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Machbarkeitsstudie „Wasserstoff und Speicherung um Schwerlastverkehr“ kann nach Abschluss der Förderphase als Basisstudie für weitere Forschungsarbeiten im Bereich der mobilen Anwendung der LOHC Technologie angesehen werden. Das Projekt ist als äußerst erfolgreich zu bewerten. Die Kernergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- » Der Betrieb von LKW CO<sub>2</sub>-frei mit LOHC ist möglich.
- » Hauptaugenmerk der ersten Untersuchungen lag auf der Identifizierung der Anforderungen an einen zukünftigen Fernlastkraftwagen. Führende Automobilhersteller bestätigten, dass dieselbezogene LKWs nicht in jedem Bereich als Benchmark für neue Antriebstechnologien herangezogen werden dürfen. Der Standard hinsichtlich der erzielbaren Reichweite ist nicht einzuhalten, anders hingegen die Fahrdynamik, die Kaltstartfähigkeit und insbesondere der Bauraum für die Antriebseinheit.
- » LOHC-basierte Antriebsstände haben grundsätzlich das Potenzial, die Anforderungen der Automobilindustrie zu erfüllen. Bereits mit aktuellem Stand der Technik können Reichweiten von knapp 600 km erzielt werden (mit 1.500 L<sub>LOHC</sub>). Dabei ist weniger das Volumen des Antriebsstrangs limitierend, sondern die mitgeführte

Menge an LOHC. Diese ist grundsätzlich unbegrenzt, da das eingesetzte Stoffsystem nicht als Gefahrgut klassifiziert ist und das maximale Tankvolumen somit nicht durch das Regelwerk ADR auf 1.500 L begrenzt wird (anders bei Diesel oder Benzin).

- » Als Wandlungseinheit des Wasserstoffs in Antriebsenergie wurden in diesem Projekt sowohl die Brennstoffzelle (PEM oder ggf. SOFC) als auch ein Wasserstoffverbrennungsmotor betrachtet. Kernargument gegen den Verbrennungsmotor sind die Stickoxidemissionen. Dabei konnte jedoch gezeigt werden, dass mittels Wasserstoff eine sehr effektive Reduzierung der Stickoxide im Abgasstrom möglich ist. Durch die Wahl und Entwicklung geeigneter Katalysatoren wurde eine hohe Aktivität und Selektivität erzielt und NO<sub>x</sub> bereits mit geringen Mengen H<sub>2</sub> unter die Nachweisgrenze gedrückt. Darauf aufbauend wurden für die reale Anwendung konventionelle Katalysator-Wabenstrukturen mit dem Katalysator beschichtet und erfolgreich getestet. Über dieses Projekt hinaus stellt diese Technologie auch eine vielversprechende Option für die Entstickung der Abgase der aktuellen (dieselbetriebenen) Fahrzeuggeneration dar.
- » Bei der Angabe der Effizienz der Antriebseinheit darf die Wandlungseinheit (Verbrennungsmotor oder Brennstoffzelle) nicht isoliert betrachtet werden. Der Freisetzer und die Brennstoffzelle bzw. der Motor interagieren über die Wärmebereitstellung der Reaktionswärme für die H<sub>2</sub>-Freisetzung miteinander. Dies ist eine Besonderheit muss hervorgehoben werden. Hinsichtlich der Gesamteffizienz schneidet der Wasserstoffverbrennungsmotor – trotz etwas geringerem Wirkungsgrad von max. 42% im Vergleich zur PEM-Brennstoffzelle (50%) – durch die Möglichkeit der Bereitstellung eines Teils der Reaktionswärme (>300°C) besser ab. Der Einsatz einer SOFC Brennstoffzelle in Verbindung mit der LOHC-Technologie ist wärmetechnisch vielversprechend, allerdings gibt es heute keinen Grund anzunehmen, dass der Preis pro kW Antriebsleistung wesentlich sinkt.
- » Aufgrund der (anzunehmenden) Trägheit der H<sub>2</sub>-Freisetzungseinheit sowie zum Starten des Antriebsstrangs ist ein Puffersystem notwendig. Im Falle des Einsatzes einer Brennstoffzelle kann dies mittels einer Batterie, im Falle eines Verbrennungsmotors über eine H<sub>2</sub>-Pufferspeicher realisiert werden. Insbesondere Letzteres bedarf einer Speicherung des Wasserstoffs im Puffer bei hohen Drücken, um das Bauvolumen zu reduzieren. Es wurde gefolgert, dass beide Varianten denkbar sind, jedoch die Realisierung eines Puffers über eine Batterie deutlich einfacher zu konzipieren ist.
- » Hinsichtlich der Kraftstoff-Infrastruktur wurde insbesondere der Vorteil des LOHC-Konzeptes gegenüber der Druckwasserstoffspeicherung aufgezeigt: Die aktuelle Kraftstoffinfrastruktur kann mit wenigen Modifikationen genutzt werden. Sowohl konventionelle Transportvektoren (Tanklastwagen) als auch Lagertanks sind grundsätzlich LOHC-kompatibel. Hinsichtlich Zapfsäule und Zapfpistole sind Modifikationen notwendig, die nach Rücksprache mit Industrievertretern (Workshop Infrastruktur) jedoch in absehbarer Zeit realisierbar sind. Die Installation sowie der Betrieb einer LOHC-Tankstelle ist aus sicherheitstechnischen Gesichtspunkten ohne Einschränkungen realisierbar. Insbesondere die sukzessive Einführung von LOHC als Kraftstoff ist mit der existierenden Infrastruktur ausgesprochen preisgünstig.
- » Hinsichtlich der gesetzlichen Regelungen wurde dargestellt, dass die Einführung von LOHC als „Kraftstoff“ in der Mobilität mit den aktuellen Normen und Vorschriften nicht abbildbar ist. Kernaspekt im Bereich der Tankstelleninfrastruktur lag hierbei auf der Art der Abrechnung des LOHCs sowie die Einführung eines LOHC-Pfandsystems. Im Konkreten konnte die Frage nicht beantwortet werden, über welche Größe das bezogene und zurückgegebene LOHC abgerechnet werden soll. Bei aktuellen Kraftstoffen erfolgt die Preisbildung über das verkaufte (temperaturkorrigierte) Volumen. Im Falle des LOHCs kommt der Hydriergrad als weiterer

Parameter hinzu. Ein Konsortium zur Konzeptionierung und Zulassung einer LOHC-Zapfsäule wurde gebildet und steht für die nächsten Schritte bereit.

## 2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Arbeiten innerhalb dieser Machbarkeitsstudie zeigen Wege auf, wie der Schwerlastverkehr CO<sub>2</sub>-frei gestaltet werden kann. Dies ist eine wesentliche Hürde, um die Klimaschutzziele der Bundesregierung einzuhalten - schließlich entfallen circa 30 % der Emissionen des Verkehrssektors (selbst 18% der Gesamtemissionen in Deutschland) auf den Güterverkehr. Damit sind Notwendigkeit dieses Forschungsansatzes und die Studien auf dem Gebiet des Vorhabens gerechtfertigt.

Im Rahmen des Vorhabens wurde der Schwerpunkt auf die technische Umsetzbarkeit und nur in Teilen auf die ökonomische Bewertung der Konzepte gelegt. Die Arbeiten sind angemessen und dahingehend gerechtfertigt, dass zunächst die grundlegende Realisierbarkeit eines LOHC-basierten Antriebsstrangs und einer LOHC-Infrastruktur belegt werden muss.

Zudem sind viele Teilaspekte, die während der Projektlaufzeit untersucht wurden, für andere Anwendungsbereiche der LOHC-Technologie aber auch der allgemeinen Wasserstoff-Technologie von Bedeutung. Dabei ist insbesondere die Diskussion über die Abrechnungsmöglichkeiten des Energieträgers LOHC zu nennen. In diesem Kontext wurden enge Kontakte zu Tankstellenbetreibern, Zapfsäulenherstellern sowie zur Physikalisch Technischen Bundesanstalt geknüpft. Auch für die eine stationäre Nutzung der LOHC-Technologie werden die im Rahmen dieses Projektes erarbeiteten Grundlagen von Bedeutung sein. Darüber hinaus wurde ein Konzept erarbeitet, wie mit LOHC (bzw. dem darin gespeicherten H<sub>2</sub>) eine effiziente Reduzierung von Stickoxiden in Abgasströmen möglich ist. Dieser Ansatz ist auch für eine aktuelle (dieselbetriebene) Fahrzeuggeneration möglich und weißt entscheidende Vorteile gegenüber dem Einsatz von AdBlue® auf.

Während der Durchführung der Studien sind dem Zuwendungsempfänger Fortschritte durch andere Arbeitsgruppen auf dem Gebiet des Vorhabens bekannt geworden, die Relevanz für das untersuchte Konzept haben. So wurde im September 2017 ein LOHC-basierter Antriebsstrang (mit Brennstoffzelle) für einen Kleinbus in der chinesischen Stadt Wuhan vorgestellt. Der Zuwendungsempfänger ist zusammen mit einer kleinen Delegation (deutsche Firmen/Institute) nach Wuhan gereist, um sich vor Ort ein Bild zu machen. Der Zuwendungsgeber wurde über diese Entwicklungen in Kenntnis gesetzt durch einen gesonderten Bericht über die Details informiert. Zudem wurde bekannt, dass Nissan eine SOFC mit dem Treibstoff Ethanol in einen Van einbauen wird.

Die Entwicklungen aus Wuhan beweisen, dass die LOHC-Technologie im internationalen Mobilitätsbereich Einzug finden wird/kann. Bei dem Besuch des Zuwendungsempfängers konnte sich dieser im Rahmen einer Probefahrt vor Ort überzeugen. Im Konkreten ist jedoch über den Aufbau des Antriebsstrangs sowie das verwendete Stoffsystem der chinesischen Busse nichts bekannt. Darüber hinaus konnte der Zuwendungsempfänger keine existierende LOHC-Infrastruktur sowie durchdachte Lösungen hinsichtlich des Tankvorgangs auffinden. Die Gedanken und angestoßenen Diskussionen im Rahmen dieser Machbarkeitsstudie (insbesondere dem Abrechnungssystem und der Eichfähigkeit) sind den chinesischen Entwicklungen (teils deutlich) voraus.

## 2.4 Nutzen der Projektergebnisse

Die Ergebnisse dieser Studie ermöglichen in einer nächsten Phase die fahrzeugseitige und infrastrukturelle Pilotierung des vorgeschlagenen Konzeptes. Zu diesem Zweck wurden in Rahmen des Projektes auch erste Diskussionsrunden initiiert und die potentiellen Partner an einen Tisch gebracht (siehe Kapitel 1.3).

Unabhängig von der weiteren Verfolgung eines LOHC-basierten Antriebsstrangs sind folgende Ergebnisse von übergeordnetem Nutzen:

- » Entwicklung eines neuartigen Konzeptes zur (effektiven) Reduzierung von Stickoxiden in dieselbetriebenen Fahrzeugen (via LOHC und H<sub>2</sub>)  
**Schutzrechtsanmeldung:** DE102016011208, *Verfahren und Vorrichtung zur Verminderung des Stickoxidausstoßes von Verbrennungsmotoren*, W. Arlt, M. Wensing, J. Karl
- » Kontaktaufnahme zu unterschiedlichen Eichämtern und zur physikalisch-technischen Bundesanstalt zur intensiven Diskussion der Wege zur Zulassung von LOHC als Energieträger (neben Mobilität insbesondere auch in der stationären Anwendung als Energiespeicher)
- » Öffentlichkeitsarbeit rund um die Themen Wasserstoff in der Mobilität und dem Einzug erneuerbarer Energien in die Mobilität

Darüber hinaus wurde die Thematik des Vorhabens am Lehrstuhl für Thermische Verfahrenstechnik im Rahmen mehrerer Vorlesungen, Bachelor- und Masterarbeiten in der Lehre behandelt.

## 2.5 Veröffentlichung der Projektergebnisse

Die Hintergründe, die Theorie sowie die Ergebnisse dieses Projektes wurden im Rahmen einer Machbarkeitsstudie sowohl online als auch in einer geringen Auflage in gedruckter Version veröffentlicht. Dieses Schriftstück kann selbst als eines der Kernergebnisse dieses Projektes angesehen werden. Darüber hinaus wurden die Ergebnisse auf einer Reihe internationaler Konferenzen vorgetragen. Gekoppelt an den öffentlichen Workshop im September 2017 am Energie Campus Nürnberg wurden zudem mehrere Pressemitteilungen veröffentlicht sowie Radiointerviews aufgezeichnet. Eine Übersicht aller Veröffentlichungen ist im Folgenden dargelegt.

### Wissenschaftliche Fachtagungen

- » W. Arlt, D. Teichmann, J. Obermeier. Application of Liquid Organic Hydrogen Carrier in Mobility (Keynote). 6<sup>th</sup> International Conference on Fuel Cell & Hydrogen Technology (ICFCHT2017), Putrajaya, Malaysia, 11.-13.04.2017
- » W. Arlt, J. Obermeier, LOHC in Mobility: The German Development. I-LOHC Workshop, Wuhan, China, 21.09.2017
- » W. Arlt, D. Teichmann, J. Obermeier. Application of Liquid Organic Hydrogen Carrier in Mobility. AIChE Annual Meeting, Minneapolis, Vereinigte Staaten von Amerika, 29.10.-03.11.2017
- » J. Obermeier, W. Arlt. Application of Liquid Organic Hydrogen Carrier in Mobility – A Feasibility Study, Integration of Sustainable Energy EXPO & CONFERENCE (iSENEC 2018), 17.-18.7.2018, Nürnberg (eingereichter Beitrag)

### Online-Veröffentlichung

- » W. Arlt. Machbarkeitsstudie – Wasserstoff und Speicherung im Schwerlastverkehr, Projektbericht, 31.7.2017 online verfügbar: [https://www.tvt.cbi.uni-erlangen.de/LOHC-LKW\\_Bericht\\_final.pdf](https://www.tvt.cbi.uni-erlangen.de/LOHC-LKW_Bericht_final.pdf)

### Presse

- » Radiointerview, Bayern2 regionalZeit Gespräch mit Dr. Jonas Obermeier, gesendet am 15.09.2017, online verfügbar:  
<http://www.ardmediathek.de/radio/regionalZeit-Gespr%C3%A4ch/Dr-Jonas-Obermeier-arbeitet-mit-am-emiss/Bayern-2/Audio-Podcast?bcastId=7275178&documentId=45952194>
- » Interview, LaWiki Bayern, mit Prof. Dr. Wolfgang Arlt, online verfügbar:  
<http://www.lawiki.bayern/lohc-verbrennungsmotor.html>
- » Radiointerview, Deutschlandfunk, Gespräch mit Prof. Dr. Wolfgang Arlt und Dr. Daniel Teichmann (Hydrogenious Technologies GmbH), gesendet am 30.10.2017, online verfügbar:  
[http://ondemand-mp3.dradio.de/file/dradio/2017/10/30/angereichertes\\_oel\\_unkomplizierter\\_transport\\_und\\_lagerung\\_dlf\\_20171030\\_1645\\_791ac1e8.mp3](http://ondemand-mp3.dradio.de/file/dradio/2017/10/30/angereichertes_oel_unkomplizierter_transport_und_lagerung_dlf_20171030_1645_791ac1e8.mp3)



# 3 Erfolgskontrollbericht

## 3.1 Beitrag des Ergebnisses zu den förderpolitischen Zielen

Dieses Vorhaben wurde im Rahmen des Nationalen Innovationsprogramms Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie Phase 2 (NIP II) gefördert. Schwerpunkt dieses Förderprogramms ist die Nachhaltige Mobilität und die Marktaktivierung in diesem Themenfeld:

*„Die Maßnahmen des BMVI im Rahmen der Fortsetzung des NIP zielen darauf ab, Mobilität mit Wasserstoff- und Brennstoffzellen in den nächsten zehn Jahren wettbewerbsfähig im Markt zu etablieren. Dies umfasst fahrzeugseitige Technologien und Systeme ebenso wie die jeweils notwendige Kraftstoffinfrastruktur, die auch einen Beitrag zum Klimaschutzplan 2050 der Bundesregierung leisten können.“* Ferner ist das Ziel *„die Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie bis zur Mitte des nächsten Jahrzehnts wettbewerbsfähig im Verkehrssektor und im Energiemarkt zu etablieren. (. . .) Im Fokus dieser Förderrichtlinie liegt folglich die anwendungsbezogene Marktaktivierung.“*

Das Vorhaben **Machbarkeitsstudie – Wasserstoff und Speicherung im Schwerlastverkehr** behandelt die in der Ausschreibung des NIP II adressierten Aspekte:

- » der fahrzeugseitigen Entwicklung (neuartiger) nachhaltiger Antriebskonzepte basierend auf bereits existierenden Technologien
- » der Konzeptionierung einer LOHC-Kraftstoffinfrastruktur, die mit aktuellen Speicher- und Transportvektoren vollständig kompatibel ist
- » dem Aufzeigen von Möglichkeiten einer Wasserstoffinfrastruktur, die LOHC als H<sub>2</sub>-Trägersubstanz nutzt und damit eine technisch einfache (und sichere) Lösung für den Transport und die Speicherung von Wasserstoff darstellt
- » der Marktaktivierung im Kontext der LOHC-Technologie und Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit wasserstoffbasierter Energiekreisläufe

## 3.2 Wissenschaftlich-technische Ergebnisse des Vorhabens

Die wissenschaftlich-technischen Ergebnisse des Vorhabens lassen sich kurz zusammenfassen:

- » Erstmalige Konzeptionierung eines LOHC-basierten Antriebsstrangs für den Schwerlastverkehr
- » Simulationsgestützte Abbildung unterschiedlicher Varianten eines LOHC-basierten Antriebsstrangs zeigt Konkurrenzfähigkeit zur druckwasserstoff-basierten Ansätzen auf
- » Entwurf und Schutzrechtsanmeldung einer neuartigen Möglichkeit zur effektiven Reduzierung von Stickoxiden in Abgasen (Anwendung für Wasserstoffverbrennungsmotoren aber auch für konventionelle, dieselbetriebene Verbrennungsmotoren)

- » Identifizierung rechtlicher Fragestellungen bei der Nutzung von LOHC als Wasserstoff- bzw. Energieträger und Formulierung einer ToDo-Liste in Zusammenarbeit mit der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt

Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass dieses Vorhaben innerhalb der hier gelisteten Punkte auch Lösungen für Teilaspekte generiert hat, die für unterschiedliche Forschungsgruppen von großem Interesse sind. Eine ausführliche Berichterstattung der Ergebnisse ist in Kapitel 2.1 und der veröffentlichten Machbarkeitsstudie (siehe Veröffentlichungen) dargelegt.

Hinsichtlich der gesammelten Erfahrungen können folgende Punkte angeführt werden:

- » Kontakt zu führenden Vertretern projektrelevanter Branchen (siehe Kapitel 3.3)
- » Verfassen einer umfangreichen Machbarkeitsstudie, die als Basis für weiterführende Arbeiten im Themenfeld LOHC und Mobilität angesehen werden kann
- » Organisation öffentlicher Workshops und Podiumsdiskussionen

### 3.3 Fortschreibung des Verwertungsplans

Im Folgenden wird Stichpunktartig zu einzelnen Aspekten Bezug genommen.

- » **Schutzrechtsanmeldung**  
Im Rahmen dieses Projektes wurde eine Schutzrechtsanmeldung eingereicht. Der Titel lautet „*Verfahren und Vorrichtung zur Verminderung des Stickoxidausstoßes von Verbrennungsmotoren*“ und die Anmeldung wird unter der Nummer DE102016011208 geführt.  
Die Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU) hat das Patent an die Firma Hydrogenious Technologies GmbH übertragen. Als Erfinder werden Prof. Wolfgang Art, Prof. Michael Wensing sowie Prof. Jürgen Karl (alle FAU) geführt.
- » **Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende**  
Die wirtschaftlichen Erfolgsaussichten lassen sich schwer formulieren. Trotz des großen Erfolgs des Vorhabens und dem großen Anklang der veröffentlichten Machbarkeitsstudie konnte kein Automobilkonzern gefunden werden, der die Pilotierung eines LOHC-basierten Antriebsstrangs federführend tragen würde<sup>1</sup>. Dies ist jedoch eine entscheidende Voraussetzung für die weiterführende Förderung und Umsetzung dieses Konzeptes. Zum aktuellen Zeitpunkt steht der Zuwendungsempfänger mit unterschiedlichen Firmen und Instituten in Kontakt, um die Demonstration einer LOHC-basierten Antriebseinheit in Eigenregie (ohne deutschen Automobilkonzern) umzusetzen. Der Anklang ist sehr groß, insbesondere in China.
- » **Wissenschaftlich-technische Erfolgsaussichten nach Projektende und Anschlussfähigkeit**  
Das Vorhaben hat die Voraussetzungen für eine Umsetzung der Technologie im Demonstrations- und Pilotmaßstab geschaffen. Hinsichtlich der Pilotierung wurde Kontakt zu einer Vielzahl an Instituten und Firmen geknüpft.
  - **Abgasnachbehandlung** (Technische Universität Bergakademie Freiberg, Keyou GmbH)
  - **Automobilkonzern** (Audi AG, Daimler AG, MAN Truck & Bus AG, Volkswagen AG)

<sup>1</sup> Dies ist laut NOW GmbH jedoch unerlässlich für eine weitere Förderphase.

- **Automobilzulieferer** (L'Orange GmbH, Brose Fahrzeugteile GmbH & Co. KG, Schaeffler AG)
- **Brennstoffzelle** (IAV GmbH)
- **Elektrolyseur** (ThyssenKrupp AG, Siemens AG)
- **Erneuerbare Energien** (Energiepark Mainz, Stadtwerke Haßfurt, WIND-WASSERSTOFF-projekt GmbH & Co. KG, WINGAS GmbH)
- **Kraftstofflogistik** (JET Tankstellen Deutschland GmbH, Philips 66 Continental Holding GmbH, Schrader-T+A Fahrzeugbau GmbH & Co. KG)
- **Kraftstoffzulassung und –abrechnung** (Physikalisch-Technische Bundesanstalt)
- **LOHC-Technologie** (Hydrogenious Technologies GmbH)
- **Messtechnik für Abrechnungsverfahren** (Schmidt & Haensch GmbH & Co.)
- **Reaktordesign** (Institut für Mikroverfahrenstechnik (KIT Karlsruhe), Lehrstuhl für Chemische Reaktionstechnik (FAU))
- **Schwerlastverkehr** (Bundesverband Güterverkehr Logistik und Entsorgung e.V.)
- **Tankstelleninfrastruktur** (ELAFLEX HIBY Tanktechnik GmbH & Co. KG, Gilbarco Veeder-Root, Scheidt&Bachmann GmbH)
- **Wasserstoffmobilität** (H2-Mobility Deutschland GmbH & Co. KG, NOW GmbH)
- **Wasserstofftechnologie** (Linde AG)
- **Wasserstoffverbrennungsmotor** (Keyou GmbH, Adapt-engineering GmbH & Co. KG, Lehrstuhl für Technische Thermodynamik (FAU))

### 3.4 Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben

Die Bildung eines Konsortiums für die fahrzeugseitige Demonstrierung des LOHC-basierten Antriebsstrangs konnte im Rahmen dieses Projektes nicht abgeschlossen werden. Grund hierfür ist das Zögern und die Skepsis der großen Automobilkonzerne.

Darüber hinaus konnte der in der zweiten Projektphase vorgeschlagene Kontakt zwischen den Firmen Keyou GmbH und Hydrogenious Technologies GmbH nicht intensiviert werden. Ziel wäre es gewesen, einen Zeit- und Kostenplan für die Umrüstung eines Wasserstoff-Buses - im Besitz der Keyou GmbH – von Druckwasserstoff auf die LOHC-Technologie aufzustellen.

Ohne einen Fahrzeugbauer (Automobilkonzern) im Konsortium ist keine Entscheidung über die Art des Tanksystems zu treffen. Im Rahmen dieser Projektlaufzeit konnte die Wahl zwischen einem Blasen- oder Mehrkammertank nicht final geklärt werden.

### 3.5 Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung

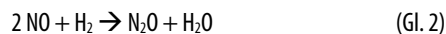
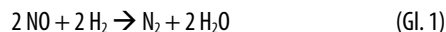
Der Zeitplan zur Bearbeitung der Arbeitspakete konnte grundsätzlich eingehalten werden. Es kam zu kleineren Verzögerungen durch eine (zweimalig) rückwirkende Bewilligung der Projektphasen. Für die erste Projektphase wurde eine kostenneutrale Verlängerung beantragt, um die Reise des Zuwendungsempfängers in die chinesische Stadt Wuhan (September) über das Projekt und die verbleibenden Mittel der ersten Phase abrechnen zu können. Aufgrund der

verspäteten Mitteilung der Zuwendung für die zweite Projektphase wurde auch hier eine kostenneutrale Verlängerung beantragt und stattgegeben. Durch besondere Vorkommnisse notwendig gewordene Mittelumwidmungen sind stets in Rücksprache mit dem Zuwendungsgeber erfolgt.

# Anhang

## 1. Bericht H<sub>2</sub>-deNO<sub>x</sub> (Prof. Sven Kureti)

Gegenstand der Studie der TUBAF ist die NO<sub>x</sub>-Reduktion durch H<sub>2</sub> (H<sub>2</sub>-deNO<sub>x</sub>) im Abgas von mager betriebenen H<sub>2</sub>-Verbrennungsmotoren unter Verwendung von WO<sub>3</sub>/ZrO<sub>2</sub>-geträgerten Pt- und Pd-Katalysatoren. Das Ziel der Arbeiten ist dabei die weitere Verbesserung bzw. Evaluierung der Katalysatoren in Bezug auf die H<sub>2</sub>-Eduktselektivität und die Minimierung der N<sub>2</sub>O-Selektivität. Bei der H<sub>2</sub>-deNO<sub>x</sub>-Reaktion reagiert das Reduktionsmittel H<sub>2</sub> in erheblichem Umfang mit dem im Überschuss vorhandenen O<sub>2</sub>, während die NO<sub>x</sub>-Reduktion nicht selektiv zu N<sub>2</sub> (Gl. 1), sondern teilweise auch zum Treibhausgas N<sub>2</sub>O erfolgt (Gl. 2). Vor diesem Hintergrund beinhalten die Untersuchungen die Variierung (i) des H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>-Konzentrationsverhältnisses, (ii) des Edelmetallgehalts sowie (iii) des Pt/Pd-Verhältnisses des Katalysators.



Die Ermittlung der Aktivität und Selektivität der Katalysatoren erfolgt quasi-stationär mittels temperaturprogrammierter Reaktion (TPR) abkühlend im Bereich von 350 bis 50°C. Sofern nicht anders angegeben, werden die Messungen unter folgenden Bedingungen vorgenommen:  $m_{\text{kat}} = 500 \text{ mg}$ ,  $y(\text{NO}) = 500 \text{ ppm}$ ,  $y(\text{H}_2) = 2000 \text{ ppm}$ ,  $y(\text{O}_2) = 6 \text{ Vol.}\%$ , Ar Balance, GHSV = 80.000 h<sup>-1</sup>. Beurteilungskriterien für die katalytische Aktivität sind der maximale NO<sub>x</sub>-Umsatz, die Temperatur am NO<sub>x</sub>-Umsatzmaximum sowie der integrale NO<sub>x</sub>-Umsatz über den gesamten Temperaturbereich mit Umsätzen größer 20%. Da erhöhte NO<sub>x</sub>-Umsätze grundsätzlich mit einer effektiveren Wasserstoffnutzung bzw. verbesserten H<sub>2</sub>-Produktselektivität korrespondieren, kann bei starker NO<sub>x</sub>-Minderung und gleichzeitig konstanter H<sub>2</sub>-Dosierung von einer effektiveren Wasserstoffnutzung ausgegangen werden. Bei den o.g. Standardversuchsbedingungen liegt die maximal erreichbare H<sub>2</sub>-Selektivität bei 25%. Kenngrößen der katalytischen Selektivität sind die N<sub>2</sub>-Selektivität am Umsatzmaximum sowie die integrale Selektivität.

Der Einfluss des H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>-Konzentrationsverhältnisses wird exemplarisch am 0,41Pd/8,7W/ZrO<sub>2</sub>-Katalysator untersucht, der eine Pd-Beladung von 0,41 Ma.-% und eine W-Beladung von 8,7 Ma.-% (in Form von WO<sub>3</sub>) besitzt und der derzeit aktivste bekannte H<sub>2</sub>-deNO<sub>x</sub>-Katalysator auf Basis von Pd ist. Hierzu wird zunächst der H<sub>2</sub>-Anteil im Modellabgas von 1000 ppm auf 6000 ppm erhöht (Abb. 1). Zunächst wird eine deutliche Aufweitung des Aktivitätsbereiches von 140°C – 180°C auf 100°C – 400°C bei gleichzeitigem Sinken der Temperatur am Umsatzmaximum ersichtlich. Gleichzeitig nimmt der maximale NO<sub>x</sub>-Umsatz von 25% auf über 80% bei nahezu gleichbleibender maximaler Stickstoffselektivität zu. Die Erhöhung des maximalen NO<sub>x</sub>-Umsatzes kann jedoch nicht die sinkende H<sub>2</sub>-Selektivität ausgleichen, welche bei einer Wasserstoffkonzentration von 6000 ppm auf 7% absinkt. Die Erweiterung des Temperaturfensters führt ebenfalls zur Erhöhung des integralen NO<sub>x</sub>-Umsatzes jedoch bei sinkender integraler N<sub>2</sub>-Selektivität, da bei höheren Temperaturen die N<sub>2</sub>O Bildung zunehmend steigt.

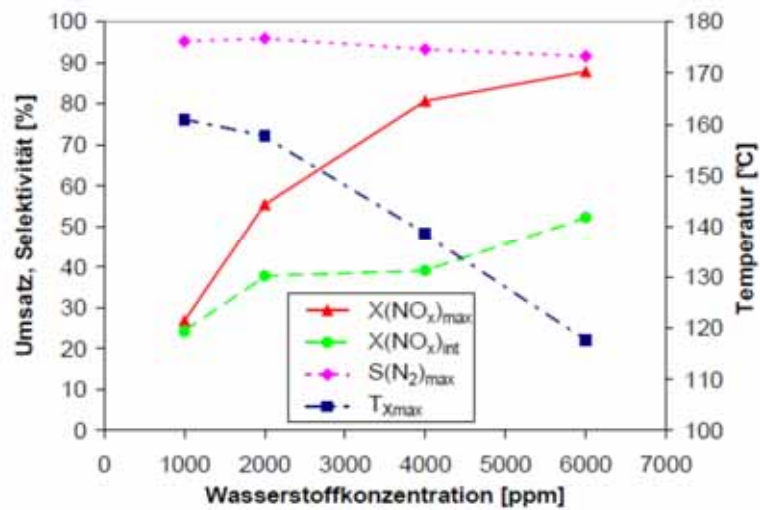


Abb. 1: Einfluss des H<sub>2</sub>-Gehalts auf maximalen und integraler NO<sub>x</sub>-Umsatz, N<sub>2</sub>-Selektivität sowie Temperatur am Umsatzmaximum bei der H<sub>2</sub>-deNO<sub>x</sub>-Reaktion am 0,41Pd/8,7W/ZrO<sub>2</sub>-Katalysator.

Darüber hinaus wird am gleichen Katalysator das O<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>-Verhältnis durch Variierung des O<sub>2</sub>-Gehalts zwischen 3 und 18 Vol.% bei konstantem H<sub>2</sub>-Anteil verändert (Abb. 2). Ähnlich der Wasserstoffkonzentration besitzt der Sauerstoffanteil im Modellabgas keinen signifikanten Effekt in Bezug auf die maximale Stickstoffselektivität. Hingegen ist ein sehr deutlicher Einfluss des O<sub>2</sub>-Anteils auf den maximalen NO<sub>x</sub>-Umsatz und damit auf die effektive Wasserstoffnutzung zu beobachten. Während bei einer Erhöhung der Sauerstoffkonzentration auf 6 Vol.% eine Steigerung des maximalen NO<sub>x</sub>-Umsatzes auf nahezu 60% bei unverändertem Temperaturbereich ersichtlich wird, führt eine weitere Steigerung auf 12 bzw. 18 Vol.% zu einer Senkung des NO<sub>x</sub>-Umsatzes auf unter 20% bei gleichzeitiger Verringerung der Temperatur am Umsatzmaximum. In Bezug auf die H<sub>2</sub>-Selektivität lässt sich damit feststellen, dass eine O<sub>2</sub>-konzentration von 6 Vol.% bei einer H<sub>2</sub>-Konzentration von 2000 ppm zu einer erhöhten H<sub>2</sub>-Selektivität von 15% führt. Höhere sowie niedrigere Konzentrationen führen zu einer Verstärkung der Nebenreaktion und damit zu einer erhöhten Wasserbildung.

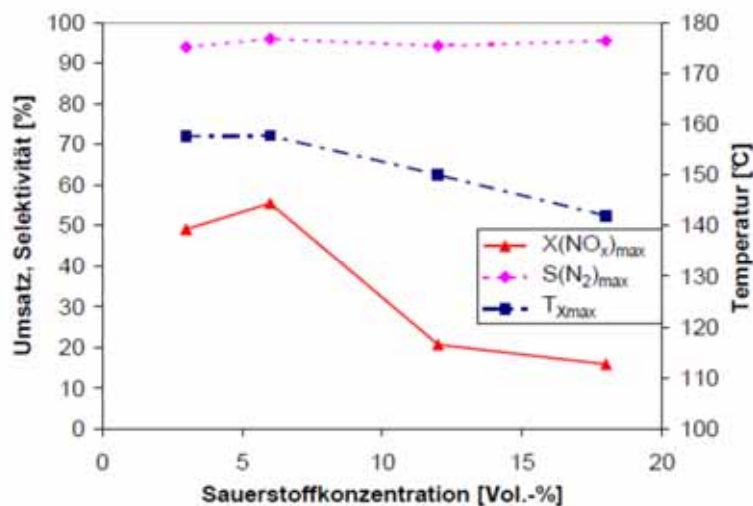


Abb. 2: Einfluss des O<sub>2</sub>-Gehalts auf maximalen und integraler NO<sub>x</sub>-Umsatz, N<sub>2</sub>-Selektivität sowie Temperatur am Umsatzmaximum bei der H<sub>2</sub>-deNO<sub>x</sub>-Reaktion am 0,41Pd/8,7W/ZrO<sub>2</sub>-Katalysator.

In Hinblick auf die Verbesserung der N<sub>2</sub>-Selektivität wird der Gehalt an Platin im Katalysator schrittweise durch Palladium substituiert, da Pd als Aktivkomponente mit vergleichsweise hoher N<sub>2</sub>-Selektivität bekannt ist. Die entsprechend getesteten Pt/Pd-Verhältnisse sind in Tab. 1 wiedergegeben. Daraus ist ersichtlich, dass mit zunehmendem Pd-Anteil die Temperatur des maximalen NO<sub>x</sub>-Umsatzes um mehr als 130°C steigt und der Stickoxidumsatzes von 99% auf 59% absinkt. Damit nimmt die Aktivität mit ansteigendem Substitutionsgrad ab. Die Substitution geht ebenfalls zu Lasten der H<sub>2</sub>-Selektivität welche von 25% auf 15% absinkt. Gleichzeitig steigt die integrale Stickstoffselektivität von 63% am reinen Platinkatalysator auf über 85% beim vollständig durch Pd substituierten Katalysator an. Eine genaue Betrachtung der eingesetzten Mischkatalysatoren ergibt, dass die beobachteten Effekte auf eine lineare Addition der reinen Edelmetallkatalysatoren zurückführbar sind und keine Synergieeffekte erzielt werden können.

Tab. 1: Temperatur am NO<sub>x</sub>-Umsatzmaximum, maximaler NO<sub>x</sub>-Umsatz, integrale N<sub>2</sub>-Selektivität bei systematischer Substitution von Pt durch Pd am 0,25Pt/8,7W/ZrO<sub>2</sub>-Katalysatorsystem (Gesamtbeladung Edelmetall: 640 µmol)

Katalysator	Atomares Pt/Pd-Verhältnis	T(X[NO <sub>x</sub> ] <sub>max</sub> ) [°C]	X(NO <sub>x</sub> ) <sub>max</sub> [%]	S(N <sub>2</sub> ) <sub>int</sub> [%]
0,25Pt/8,7W/ZrO <sub>2</sub>	4/0	58	99	63
0,19Pt/0,03Pd/8,7W/ZrO <sub>2</sub>	3/1	105	95	80
0,13Pt/0,07Pd/8,7W/ZrO <sub>2</sub>	2/2	125	68	83
0,06Pt/0,10Pd/8,7W/ZrO <sub>2</sub>	1/3	135	72	85
0,13Pd/8,7W/ZrO <sub>2</sub>	0/4	180	59	86

Zudem wird der Gehalt an Palladium im Katalysatorsystem Pd/8,7W/ZrO<sub>2</sub> verändert, um dessen Effekt in Hinblick auf DeNO<sub>x</sub>-Aktivität und N<sub>2</sub>-Selektivität zu evaluieren. Zu diesem Zweck wird die Pd-Beladung zwischen 0,14 und 0,82 Ma.-% verändert (Tab. 2). Neben einer signifikanten Erhöhung der integralen Stickstoffselektivität bei der Erhöhung der Palladiumbeladung auf 0,27 Ma.-% ist ebenfalls eine Senkung der Temperatur von 180°C auf 150°C am Umsatzmaximum zu beobachten. Dies deutet auf eine Erhöhung der katalytischen Aktivität hin. Jedoch ist ebenfalls ein leichter Rückgang des maximalen NO<sub>x</sub>-Umsatzes zu beobachten, was auf eine geringere katalytische Aktivität hindeutet sowie auch einen minimalen Rückgang der H<sub>2</sub>-Selektivität von 15% auf 14% bedeutet.

Tab. 2: Temperatur am NO<sub>x</sub>-Umsatzmaximum, maximaler NO<sub>x</sub>-Umsatz, integrale N<sub>2</sub>-Selektivität bei systematischer Erhöhung der Pd-Beladung am Pd/8,7W/ZrO<sub>2</sub>-Katalysatorsystem

Katalysator	T(X[NO <sub>x</sub> ] <sub>max</sub> ) [°C]	X(NO <sub>x</sub> ) <sub>max</sub> [%]	X(NO <sub>x</sub> ) <sub>int</sub> [%]	S(N <sub>2</sub> ) <sub>int</sub> [%]
0,14Pd/8,7W/ZrO <sub>2</sub>	180	59	40	86
0,27Pd/8,7W/ZrO <sub>2</sub>	155	53	36	95
0,41Pd/8,7W/ZrO <sub>2</sub>	160	55	38	95
0,55Pd/8,7W/ZrO <sub>2</sub>	150	62	34	97
0,68Pd/8,7W/ZrO <sub>2</sub>	150	56	34	95
0,82Pd/8,7W/ZrO <sub>2</sub>	150	43	30	94

Abschließend lässt sich sagen, dass sich bereits bei geringen Wasserstoffkonzentrationen von 1000 ppm eine hohe Stickoxidselektivität erzielen lässt, jedoch hohe Stickoxidumsätze nur bei höheren H<sub>2</sub>-Konzentrationen zu erreichen lässt. Allerdings sinkt dabei die Effektivität der Wasserstoffnutzung bis auf 7% bei 6000 ppm H<sub>2</sub>. Gleichzeitig ist auch der O<sub>2</sub>-Anteil entscheidend, da bei erhöhten Sauerstoffgehalten die H<sub>2</sub>-Produktselektivität stark nachlässt. Die maximale H<sub>2</sub>-Selektivität an Palladiumkatalysatoren von 15% konnte bei einem O<sub>2</sub>-Gehalt von 6 Vol.% und einem H<sub>2</sub>-Gehalt von

2000 ppm erzielt werden. Bei der Verwendung von Platin/ Palladium Mischkatalysatoren ist eine Abwägung zwischen Stickstoffselektivität und  $\text{NO}_x$ -Umsatz zu treffen, da mit Platin ein höherer  $\text{NO}_x$ -Umsatz von bis zu 99% mit 63%  $\text{N}_2$ -Selektivität zu erzielen ist, jedoch mit Palladium die  $\text{N}_2$ -Selektivität auf bis zu 86% bei einem maximalen  $\text{NO}_x$ -Umsatz von 59% gesteigert werden kann. In Bezug auf die  $\text{H}_2$ -Selektivität haben Platin-Katalysatoren klare Vorteile, da nur hier eine maximale  $\text{H}_2$ -Selektivität von 25% erzielt werden konnte, welche mit zunehmender Substitution mit Palladium auf 15% absinkt.



## 2. Bericht Kaltstartfähigkeit/Dynamik (Prof. Michael Wensing)

### 1. Ziel der Untersuchung

In einer vorhergehenden Grundlagenuntersuchung wurde bereits eine grobe Dimensionierung eines LOHC-basierten Antriebsstrangs für den Schwerlastverkehr durchgeführt. In dieser Untersuchung soll die Größe des für Spitzenlasten notwendigen Druckwasserstoffspeichers bestimmt werden. Diese Größe ist jedoch direkt von der Leistung des Dehydrierreaktors sowie seinen Wärmequellen abhängig, da diese je nach Konfiguration den Wasserstoffbedarf des Systems unterschiedlich gut abdecken können. Somit muss hier auch für diese Komponenten eine grundsätzliche Dimensionierung erfolgen.

### 2. Simulation

#### 2.1. Simulationsumgebung

Die Erstellung und Simulation des Fahrzeugmodells in verschiedenen Konfigurationen erfolgte in Dymola 2018 FD01 von Dassault Systèmes unter Verwendung der TIL Media-Stoffdatenbibliothek der TLK-Thermo GmbH.

#### 2.2. Modelle

Das physikbasierte Fahrzeugmodell wurde unverändert aus der vorhergehenden Untersuchung übernommen. Die Abbildung der thermischen Trägheit des Dehydrierreaktors und auch Motorblocks erfolgte über Modellierung einer uniformen Masse mit der Wärmekapazität von Stahl (460 J/kgK). Aus Abschätzungen geht hervor, dass zahlenmäßig die aufzuheizende Reaktormasse (ohne Isolierung) in Kilogramm in etwa der Wasserstoffleistung des Reaktors in Kilowatt entspricht.

#### 2.3. Modellierung thermischer Vorgänge

Die Aufheizung des Motorblocks erfolgt über eine kennfeldbasierte Berechnung des Kühlwasserwärmeeintrags und endet mit Erreichen der Zieltemperatur von 90°C. Bis zu diesem Punkt wird die abgegebene Abgastemperatur zwischen 20°C und 440°C linear interpoliert, um die reduzierten Abgastemperatur und reduzierte Abgasleistung in der Aufwärmphase des Motors abzubilden.

Die Aufheizung des Reaktorblocks erfolgt über den Zuheizer sowie die Abgasenergie des Motors. Nur Wärme mit einem Temperaturniveau oberhalb der des Reaktorblocks wird verrechnet, um physikalisch-thermodynamische Gesetzmäßigkeiten zu berücksichtigen. Ist die Reaktor-Zieltemperatur von 320°C erreicht, wird diese von einem PI-Regler gehalten und überschüssige Energie über dem Zielniveau im Dehydriervorgang bilanziert.

Der Zuheizer wurde als effizienzoptimaler Lambda-3-Brenner mit Luftvorwärmung auf 300°C modelliert, da Abwärme unterhalb der Dehydriertemperatur im System ausreichend zur Verfügung steht.

### 3. Eingangsdaten

#### 3.1. Allgemeine Fahrzeugdaten / Antriebskonfiguration

Die Fahrzeugdaten (Sattelzug, 40t Gesamtgewicht,  $A=5,3\text{m}^2$ ,  $c_w=0,53$  etc.) wurden unverändert aus der vorhergehenden Untersuchung übernommen. Als Antriebskonfiguration wurde diesmal ausschließlich der Wasserstoff-Ottomotor (16,67l Achtzylinder, 374kW bei 1500 U/min,  $l=1,91$ , Abgastemperatur 440°C) mit Wasserstoffversorgung mittel LOHC untersucht.

### 3.2. Fahrzyklus / Virtuelle Teststrecke

Die Strecken- und Geschwindigkeitsvorgabe erfolgt wie auch zuvor durch den ACEA Long Haul Cycle des Europäischen Automobilherstellerverbands ACEA in der vorgeschlagenen Version vom 29. April 2015. Um alle Leistungskonfigurationen von Zuheizer und Dehydrierreaktor untersuchen zu können, war es jedoch nötig, die Streckenlänge zu erhöhen. Dies geschah durch Aneinanderreihung von zwei der genannten Fahrzyklen, so dass sich eine Strecke von rund 200 km ergibt.

### 4. Systemregelung

Die Last und die Abgasleistung des Motors sind durch den Fahrzyklus (und die resultierende Zeit-/Geschwindigkeitsvorgabe) je nach Streckenabschnitt fest vorgegeben. Die Geschwindigkeit der Aufwärmung des Reaktors sowie seine Dehydrierleistung ergeben sich aus der zugeführten thermischen Leistung, zusammengesetzt aus Abgasleistung des Motors und Leistung des Zuheizers. Somit verbleibt als regelbare Größe die Leistung des Zuheizers.

Der Zuheizer wird über einfache, binäre (wahr/falsch) Zustandsvariablen geregelt:

- » Ist das System kalt und unterhalb der Dehydriertemperatur wird der Zuheizer auf maximaler Leistung gefahren um schnell in den Dehydrierbetrieb zu gelangen.
- » Hat der Reaktor die Zieltemperatur erreicht, wird nur so viel zugeheizt, dass der Bedarf von Motor und Zuheizer über die Dehydrierung in diesem Betriebspunkt gedeckt werden kann (außer der Bedarf überschreitet die maximale Leistung).
- » Überschreitet der Bedarf des Systems den maximal dehydrierbaren Massenstrom an Wasserstoff, so wird dieser Fehlbetrag aufintegriert und gespeichert. Der Zuheizer wird nun so betrieben, dass immer die maximale thermische Leistung am Dehydrier anliegt und der maximale Massenstrom produziert wird, bis der Fehlbetrag über Zeit rückwirkend wieder dehydriert wurde. Dies simuliert die Entnahme aus einem Pufferspeicher mit nachfolgender Wiederauffüllung.

### 5. Parametervariation

In ersten Tests wurde zunächst erprobt, welche Dimensionierung des Zuheizers im Verhältnis zur Leistung des Dehydrierreaktors überhaupt sinnvoll ist bzw. minimal benötigt wird. Hier ergab sich ein Multiplikator von ca. 0,3 auf die Reaktorleistung als minimal nötige Heizleistung um sinnvolle Ergebnisse zu erhalten.

Der Dehydrierreaktor selbst wurde in der Voruntersuchung auf rund 470 kW dimensioniert, es war jedoch bereits erkennbar, dass vermutlich zusätzliche Leistung benötigt wird um den Spitzenlast-Pufferspeicher nach seiner Nutzung wieder in der Teillast aufzufüllen.

Somit wurde die Leistung des Dehydrierreaktors von 470 bis 620 kW (H<sub>2</sub> Leistung / Brennwert) in 10 kW-Schritten und die des Zuheizers über einen Faktor von 0,3 bis 0,46 (Inkrement 0,2) auf die Reaktorleistung variiert. Definiert wird die Heizleistung hier als Abgasleistung über 20°C.

Des Weiteren wurde der Startpunkt im Fahrzyklus in 14 Varianten um bis zu 70 km verschoben, da das Fahrprofil und die Motorlast zu Beginn einen Einfluss auf die Aufheizdauer und den Startpunkt des Dehydrierbetriebs haben. Die erzeugten 14 Ergebnisse pro Variante wurden dann statistisch ausgewertet (Maximum für Pufferspeicher, Median für alle anderen Werte) und auf diesem Weg in ein einzelnes Ergebnis überführt.

Da sich bei Vortests gezeigt hatte, dass die Aufheizphase des Reaktors grundsätzlich zeitlich eher unkritisch ist und somit auch die Starttemperatur des Reaktorblocks einen geringeren Einfluss als zunächst vermutet hat, wurde diese Variation nicht durchgeführt und das System in der Simulation immer mit 20°C gestartet. Die zu erwartenden Unterschiede sind für eine Variante dennoch im Ergebnisteil dargestellt.

## 6. Ergebnisse

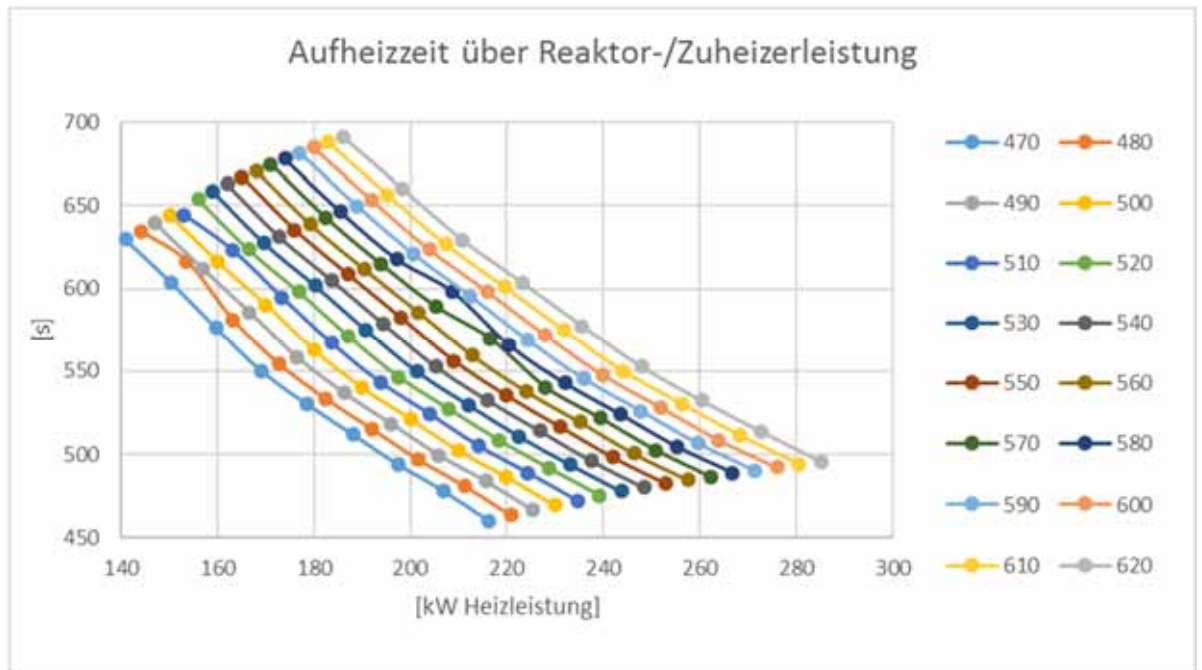


Diagramm 1: Aufheizzeit des Systems

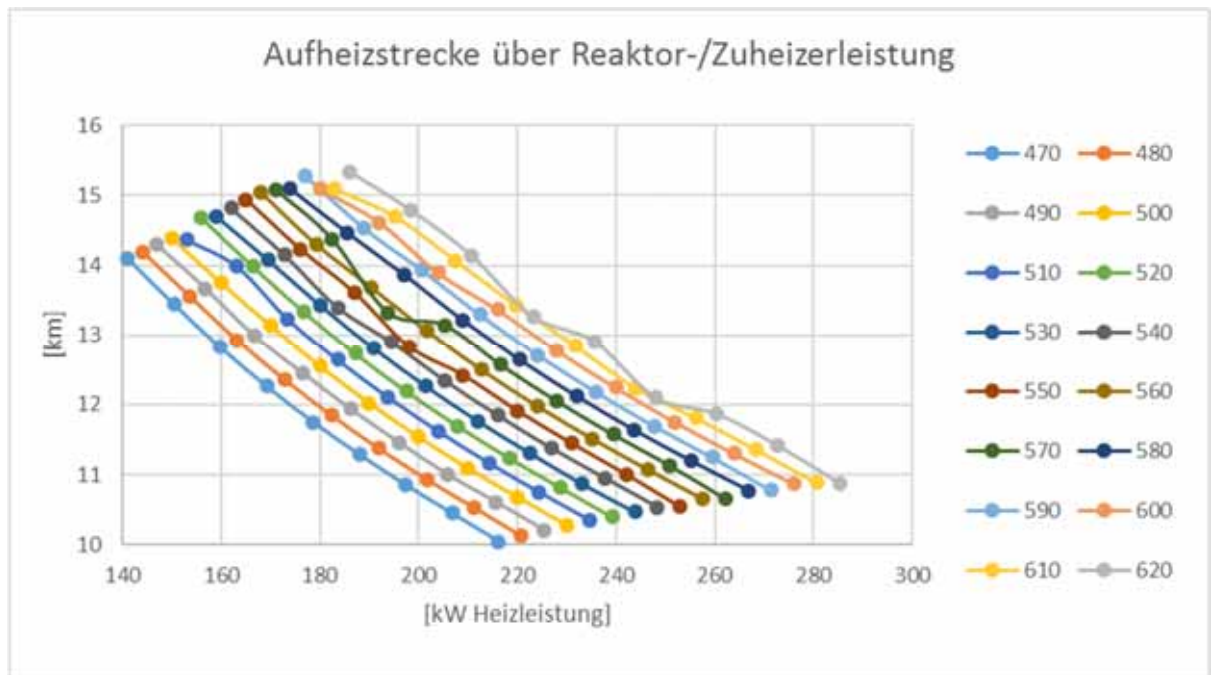


Diagramm 2: Aufheizstrecke des Systems

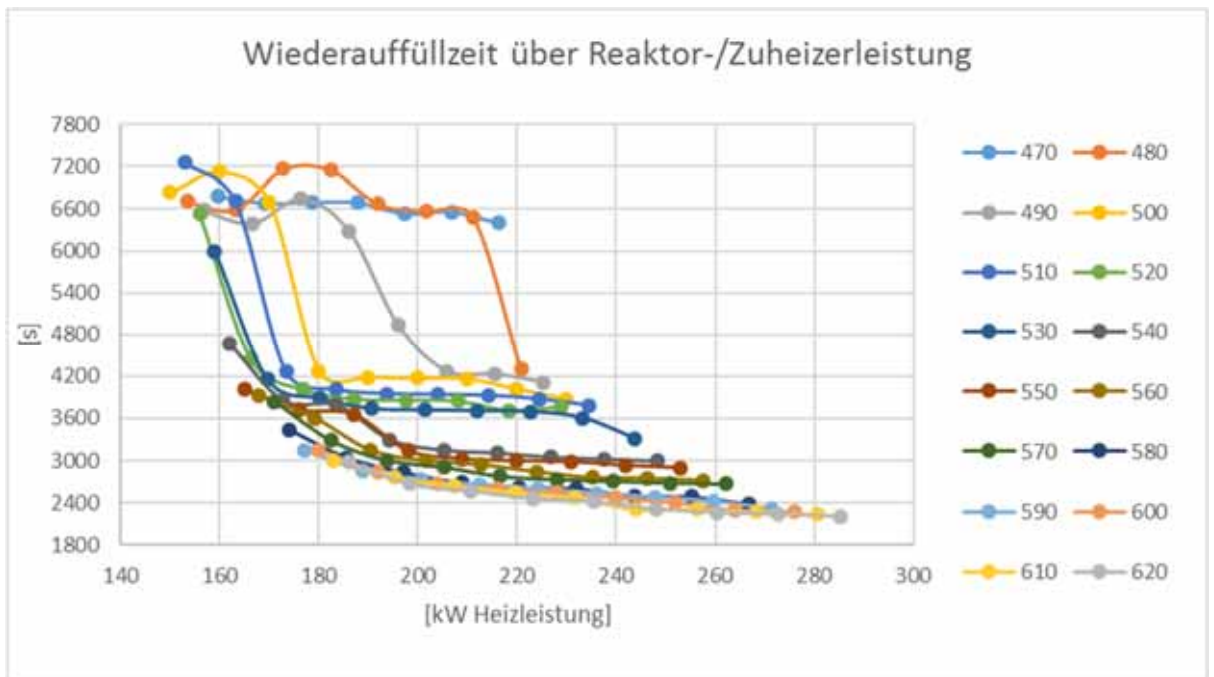


Diagramm 3: Wiederauffüllzeit des Systems  
(nach dieser Zeitspanne, gemessen ab Fahrzeugkaltstart, kann das Fahrzeug wieder für einen Kaltstart abgestellt werden)

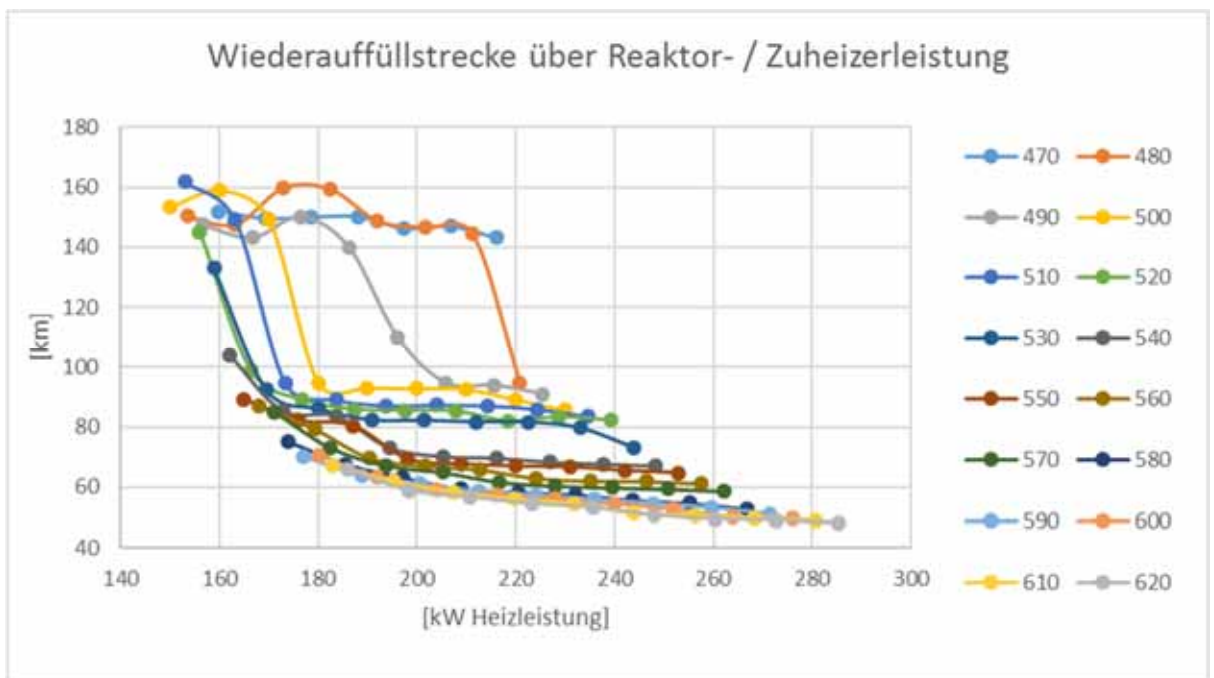


Diagramm 4: Wiederauffüllstrecke des Systems  
(nach dieser Strecke, gemessen ab Fahrzeugkaltstart, kann das Fahrzeug wieder für einen Kaltstart abgestellt werden)

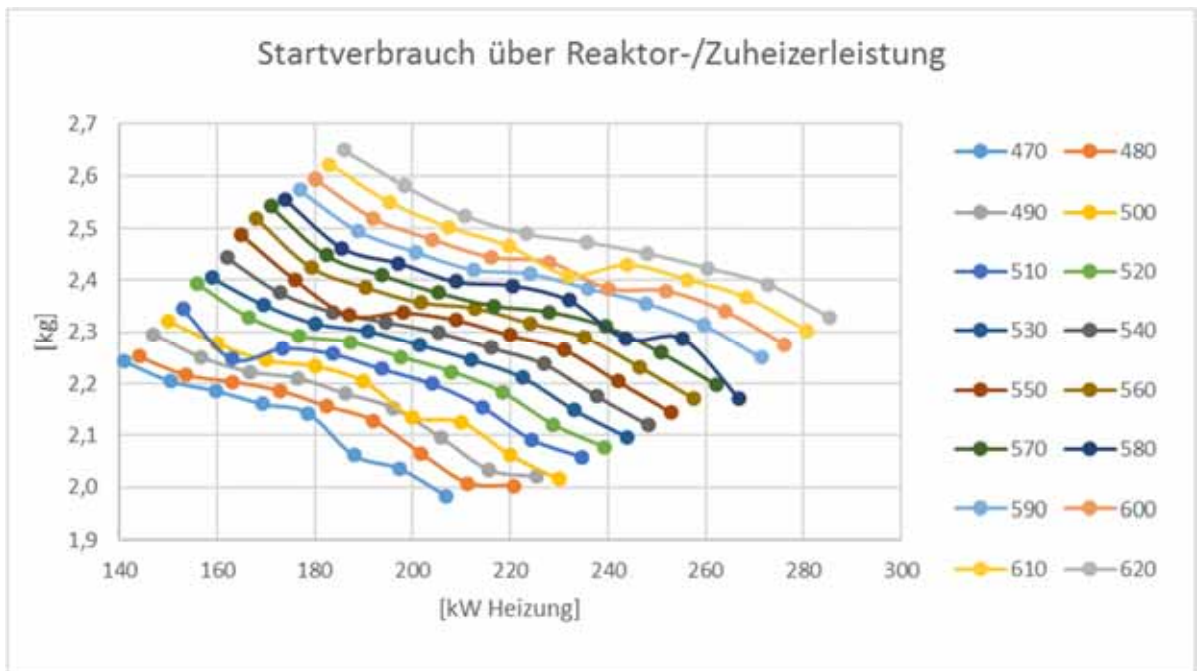


Diagramm 5: Startverbrauch des Systems von Kaltstart bis Dehydrierbetrieb

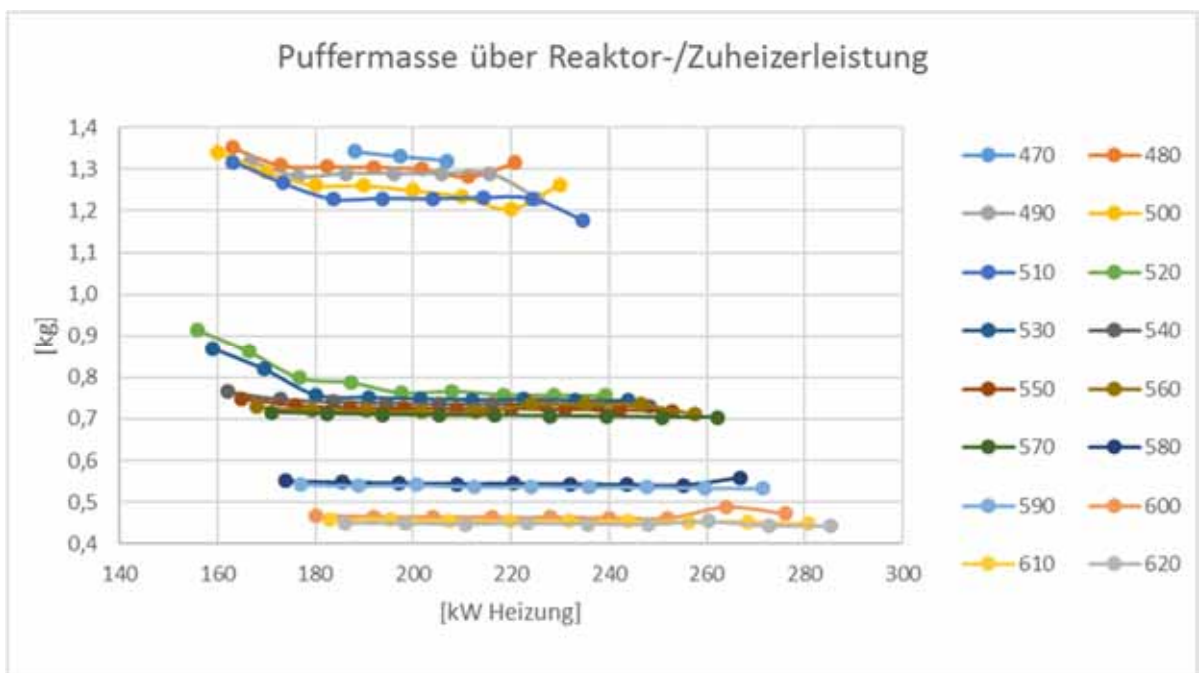


Diagramm 6: Puffermasse um Spitzenlast bedienen zu können

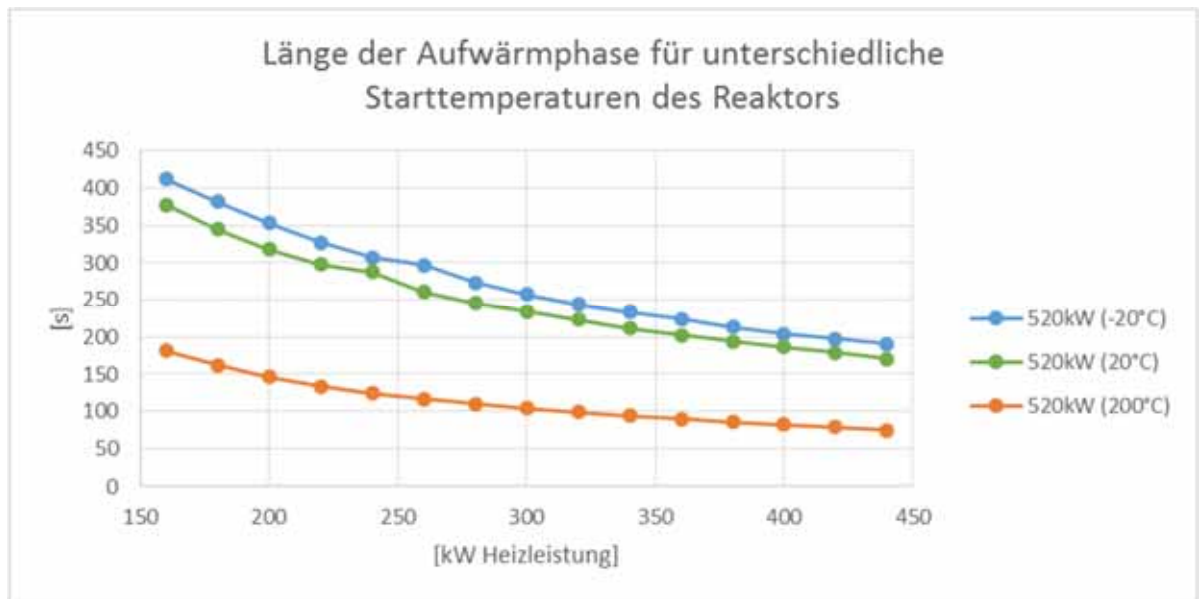


Diagramm 8: Länge der Aufwärmphase für unterschiedliche Starttemperaturen

## 7. Erläuterung und Diskussion

Bei der Betrachtung der Ergebnisse gilt es grundsätzlich zu beachten, dass nicht alle der 1008 simulierten Parametervarianten numerisch stabil sind oder Probleme in der Einregelung auftreten und sie nicht vollständig simuliert werden konnten. Diese wurden im Nachgang weitgehend händisch entfernt. Des Weiteren weisen sowohl die Streckeneingangsdaten als auch die Motorkennfelder eine relativ grobe Rasterung auf, so dass es in Grenzfällen zu Sprüngen im Ergebnis kommen kann. Diese erscheinen als kleine Ausreißer in den oft progressiv verlaufenden Kurven.

Die Aufheizphase verläuft mit maximal errechneten 700 Sekunden erstaunlich schnell, erhöht sich wie erwartet mit steigender Reaktorgröße und sinkt wieder mit steigender Heizungsgröße. Ein Einfluss der Fahrstrecke bzw. Motorleistung ist hier kaum ersichtlich. Dies ist damit zu begründen, dass der Motor selbst ca. 600 Sekunden braucht um auf Betriebstemperatur zu kommen und volle Abgasleistung abzugeben, gilt es doch einen 1,8 Tonnen schweren Motorblock aufzuheizen. Somit erscheint es auch absolut möglich einen Reaktorblock mit max. 620 kg und einer Heizung von ca. 200 kW in dieser Zeit aufzuheizen. In Diagramm 8 ist zusätzlich zu sehen, dass die Starttemperatur des Reaktors durch unterschiedliche Außentemperaturen (hier +20°C und -20°C) kaum einen bedeutenden Einfluss auf die resultierende Zeitspanne hat. Hat das System noch Restwärme und eine Temperatur von 200°C, so ist es praktisch umgehend startbereit. Eine gute Isolierung und die einhergehende Vermeidung täglicher Kaltstarts erscheinen hierdurch sehr sinnvoll.

Die „Wiederauffüllzeit“ bzw. „Wiederauffüllstrecke“ bezeichnet die Zeitspanne bzw. Wegstrecke ab Start, die mindestens bewältigt werden muss, bis der in der Aufwärmphase verbrauchte Wasserstoff wieder im Betrieb (in Teillastphasen) überschüssig produziert wurde, der Tank wiederaufgefüllt wurde und somit ein erneuter Kaltstart möglich wäre. Hier zeigt sich klar, dass bei Varianten unter 520 kW Reaktorleistung kein stabiler Betrieb möglich ist und die Ergebnisse noch sehr stark von der Fahrstrecke abhängig sind, da kein ausreichender Wasserstoffüberschuss produziert werden kann.

Bei der Auslegung der Drucktankgröße kann zunächst festgestellt werden, dass die Wasserstoffmasse für den Startvorgang immer um den Faktor zwei bis drei größer ist als die Masse, die im getesteten Fahrzyklus für Spitzenlasten entnommen werden muss. Somit ist der Startverbrauch die bestimmende Größe für die Auslegung des Drucktanks. Beim Startverbrauch ergibt sich wie bei Zeitspanne und Fahrstrecke der Aufwärmphase ein Anstieg mit Reaktorgröße und ein Absinken mit Heizleistung, da schneller in den Dehydrierbetrieb gewechselt werden kann.



Als sinnvolle Konfiguration lässt sich bspw. eine Reaktorgröße von 530 kW H<sub>2</sub> mit einer Heizleistung von 190 kW identifizieren: Die Aufheizzeit liegt knapp unter 10 Minuten bzw. 13 km, die Wiederauffüllzeit bei knapp über einer Stunde (3700 s) bzw. 80 km, was im Fernverkehr aber akzeptabel sein sollte, und die benötigte Masse an Druckwasserstoff bei mind. 2,3kg.

#### **8. Übertragbarkeit auf andere Antriebskonfigurationen**

In dieser Untersuchung wurde nur die Kombination eines Wasserstoffotomotors mit einem LOHC-basierten Speichersystem und einem Wasserstoffbrenner als Zuheizung untersucht. Für Systeme mit geringeren Abwärmeströmen, die für den Betrieb des Reaktors genutzt werden können, sind die Ergebnisse nur sehr bedingt übertragbar, da im Fahrbetrieb größere Zuheizungen benötigt werden. Die Aufheizphase dürfte jedoch sehr ähnlich, wenn nicht sogar gleich verlaufen, da das kalte Antriebsaggregat hier noch keinen spürbaren Einfluss hat und die Leistung des Zuheizers dominiert.

## 3. Bericht Direkt-LOHC-Brennstoffzelle (Prof. Peter Wasserscheid)

### 1. Grundlagen

#### 1.1 Konzept

Flüssige organische Wasserstoffträger (LOHC) stellen eine Möglichkeit dar Wasserstoff aus erneuerbaren Energien chemisch zu speichern. Der Wasserstoff wird in einer chemischen, exothermen und reversiblen Reaktion, der Hydrierung, an ein ungesättigtes organisches Molekül gebunden (siehe Abbildung 1). In seiner gebundenen Form kann der Wasserstoff unter drucklosen Bedingungen ohne Verluste gelagert und transportiert werden. Der so gespeicherte Wasserstoff kann mit Hilfe von zwei kombinierten Technologien, der Transferhydrierung und der Direkt-PEMFC, zur Rückverstromung auf mobilen Plattformen genutzt werden.

#### 1.2. Transferhydrierung

In der Transferhydrierung wird der im LOHC gebundene, hier perhydro-Dibenzyltoluol (H18-DBT), auf einen zweiten LOHC, hier Aceton, übertragen. Es entstehen das dehydrierte Dibenzyltoluol (H0-DBT) und 2-Propanol. Es handelt sich hierbei um eine hoch selektive, gleichgewichtslimitierte Reaktion die bei 150 – 190 °C stattfindet. Der maximale Umsatz liegt bei 40 – 45 %.

#### 1.3. Direkt-PEMFC

Das in der Transferhydrierung gewonnene 2-Propanol kann in einer PEM-Brennstoffzelle zur Stromerzeugung genutzt werden. 2-Propanol wird hierbei nicht wie in anderen Direktbrennstoffzellen (DMFC) zu CO<sub>2</sub> oxidiert, sondern nur partiell zu Aceton, welches wieder der Transferhydrierung zugeführt und regeneriert wird.

Das Transport-LOHC-Paar Aceton/2-Propanol dient in diesem Konzept der Überführung von Energie in Form von Wasserstoff vom Speicher-LOHC-Paar H0-DBT/H18-DBT zur Brennstoffzelle und läuft im Kreis. Auf diese Weise ist es möglich eine Brennstoffzelle ohne freien, elementaren Wasserstoff im mobilen System zu betreiben und die existierende Kraftstoffinfrastruktur zu nutzen, da das Speicher-LOHC-Paar hierzu kompatibel ist.



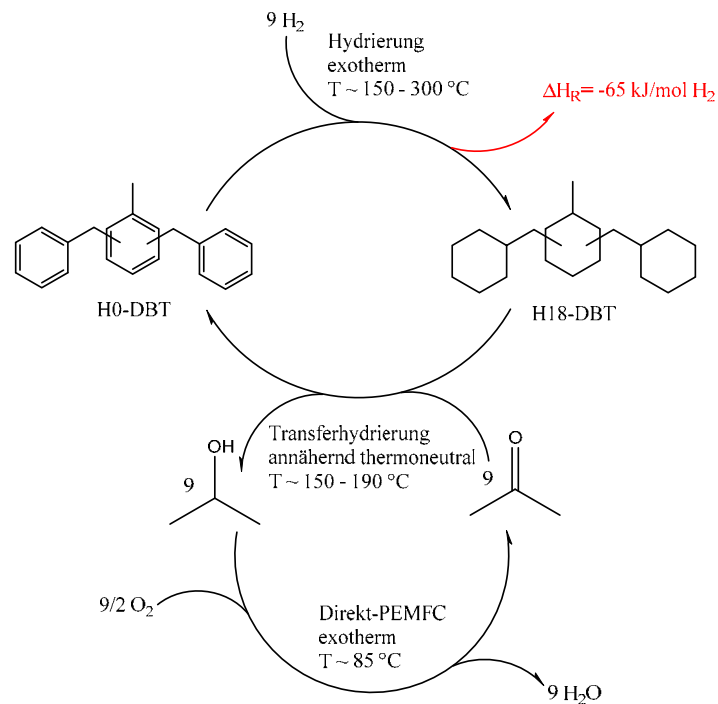


Abbildung 1: Schema des Direkt-LOHC-Brennstoffzellensystems.

## 2. Stand der Direkt-LOHC-Brennstoffzelle

Die Brennstoffzellenversuche finden in einem Einzelzellenmessstand (siehe Abbildung 2 links) statt. Auf der Kathodenseite wird Luft (trocken oder mit Wasser gesättigt) zugegeben, auf der Anodenseite wahlweise Wasserstoff oder verdampfter Brennstoff (mit oder ohne Trägergas (trocken oder feucht)). Die Charakterisierung der Zelle erfolgt anhand von Strom-Spannungs-Kurven (siehe Abbildung 2 rechts).

Als MEA kommen kommerziell verfügbare DMFC-MEAs zum Einsatz:

- » Nafion® 115 (Dicke ~ 127 µm).
- » PtRh als Anodenkatalysator, Pt als Kathodenkatalysator.
- » Verschiedene GDLs (Kohlenstoffvlies) als Gasdiffusionsmedien.

### 2.1 Bisherige Ergebnisse

Leerlaufspannung zwischen 750 und 800 mV, gut im Vergleich zur DMFC (500-600)

Maximale Leistungsdichte bis zu 80 mW/cm<sup>2</sup>

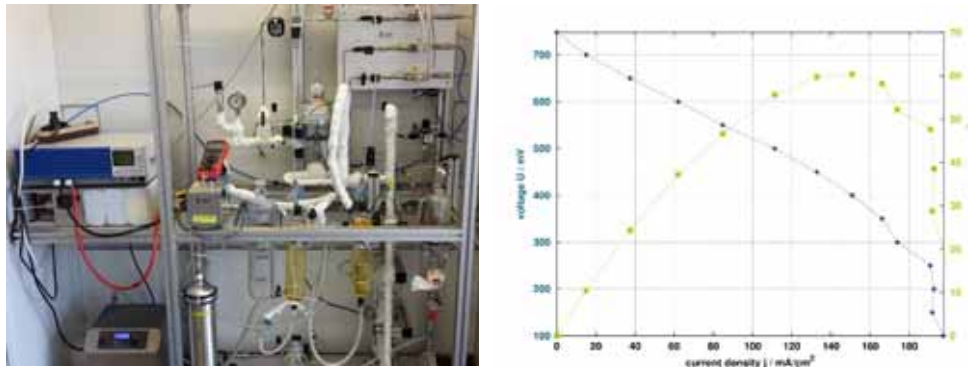


Abbildung 2: Links – Brennstoffzellenmessstand zur Untersuchung von Direkt-PEM-Brennstoffzellen; Rechts – Strom-Spannungs-Kurve von 2-Propanol,  $T = 85 \text{ }^\circ\text{C}$ .

## 2.2 Weiteres Vorgehen

- » Verbesserung der Leistungsdichte
- » Katalysatorvariation
- » Reduzierung der Ohm'schen Verluste (linearer Bereich der Strom-Spannungs-Kurve)
- » Brennstoffzellenstapel mit 2-Propanol betreiben
- » Transferhydrierung optimieren (Problemstelle hier: Gleichgewichtslage)

## 4. Bericht SO-Brennstoffzelle

Wasserstoff wird der Treibstoff der Zukunft sein. Als Gas unter Druck gespeichert, hat Wasserstoff eine zu geringe Dichte (der Energieinhalt pro Liter ist zu gering), es existiert keine Infrastruktur und gasförmiger Wasserstoff ist zu gefährlich. In Erlangen wurde daher ein Wasserstoffträger (LOHC) entwickelt, der Wasserstoff durch chemische Reaktion bindet (Beladung). Diese Reaktion ist exotherm, es wird dabei Wärme freigesetzt. Sowohl der unbeladene als auch der beladene Träger sind keine Gefahrstoffe in Europa, was die Handhabung erheblich vereinfacht. Beide Träger sind auch nicht giftig (Diesel: mindergiftig, Benzin: giftig). Eine Infrastruktur für flüssige Treibstoffe existiert seit langem und ist ohne Veränderung auf LOHC übertragbar. LOHC kann durch Flüssigkeits-Pipelines, per Schiff, per Lastwagen oder per Eisenbahn transportiert werden.

Zur Freisetzung des Wasserstoffs im Fahrzeug muss genau die Menge an Wärme verfügbar sein, die bei der Beladung frei wurde. Dieses Faktum eröffnet 2 Wege, um ein Fahrzeug zu betreiben.

### 1. Mit einer Hochtemperatur-Brennstoffzelle (SOFC)

Die heutigen Fahrzeuge sind zu 99,9% mit einer Brennstoffzelle (PEM) bei niedriger Temperatur (etwa 80°C) ausgestattet, diese Temperatur reicht bei weitem nicht zur Freisetzung des Wasserstoffs. Ein Teil des Wasserstoffs muss daher verbrannt werden, um die notwendige Wärme bei der richtigen Temperatur zu erreichen. Das reduziert den Gesamt-Wirkungsgrad mit einer PEM-Brennstoffzelle deutlich.

Die Verwendung von SOFC statt PEM wurde von Nissan beflügelt. Nissan hat 2016 ein Auto (e-NV200 electric van) entwickelt mit einer planaren SOFC als Range extender. Der Grund ist nicht das für den LOHC-Prozess notwendige hohe Temperaturniveau sondern der Treibstoff ist Bioethanol, der in einem vorgeschalteten Schritt zu Wasserstoff und CO<sub>2</sub> umgesetzt wird. Daher soll auch wasserhaltiges Ethanol ausprobiert werden. Der Wasserstoff reagiert dann in der SOFC bei „hohen Temperaturen“ ohne Seltene Erden ab. Die Reichweite wird mit 600 km angegeben, der Preis pro km gleicht dem eines Elektroautos. Die Batterie hat 24 kWh. Weitere Details sind nicht publiziert. Im Sommer 2017 wurden erfolgreiche Versuche mit 2 Fahrzeugen aus Brasilien berichtet.

Die Verfügbarkeit von alltagstauglichen SOFC wurde vom Autor bei einem Besuch in den USA vom 4.-9.2.2018 in den USA überprüft. Die besuchten Firmen waren Empfehlungen von Shailesh Vora, dem verantwortlichen Manager für Brennstoffzellen in der National Science Foundation.

Die Firma ATREX energy (Herr Cary Bullock) wurde am 5.2.18 aufgesucht. Die Firma hat 45 Mitarbeiter. Folgende Daten wurden mitgeteilt: ein Stack hält 250 Anfahrvorgänge aus, die Startzeit ist 30 min; eine SOFC ist baulich immer größer als eine PEM. Atrex verlangt 40.000\$/kW (als Verkaufspreis, intern 30.000\$/kW). Allerdings sind diese Preise incl. Reformer, mit Wasserstoff wird ein Stack billiger. Die Effizienz (bezogen auf den unteren Heizwert) liegt für Diesel bei 30-40%, bei Propan bei 50%. Die Unterschiede erklären sich durch den Reformersschritt. Die Wärmemenge aus dem Stack kann durch das Verhältnis Luft zu Brennstoff reguliert werden, was wichtig für den LOHC-Prozess ist. Zum Thema Kosatenreduktion: die Arbeitskosten machen 30-40% des Preises aus, hier ließen sich durch eine automatisierte Fertigung Kosten einsparen. Die heutigen Kunden suchen den Ersatz von Dieselaggregaten, durch die höhere Effizienz der SOFC muss deutlich weniger Diesel herbeigeschafft werden (Logistik) und zudem sind die Anlagen lautlos (wichtig fürs Militär).

Die Firma Fuel Cell Energy Inc. (Herr Hossein Ghezeli-Ayagh) baut SOFC und auch Hochtemperatur-Elektrolyseure (SOEC). Es werden 600 Personen beschäftigt, die Jahresproduktion liegt bei 50 MW. Die Zellen sind planar. Posco Energy (ein Ableger eines Stahlkonzerns) in Korea hat eine Lizenz mit 200 MW Kapazität basiert auf Methan. Eine Teilanlage hat heute

2,8 MW. Wärme kann bei etwa 400°C genutzt werden (ausreichend für den LOHC-Prozess). Die Kosten werden mit 3000 USD/kW angegeben, was in einem Strompreis von 12 US-cent/kWh enden soll. Kostendegression: Bei größeren Produktionsmengen sinkt der Overhead (Infrastruktur, ...) und der Einkaufspreis für Material sinkt. Seltene Erden sind nicht der Kostentreiber sondern Nickel an der Anode. FCE hat eine Dependence bei München, Ludwig-Bölkow-Allee 40C in 82024 Taufkirchen.

Die Fa. Watt Fuel Cells (Herr Rich Romer) baut mit nur 23 Mitarbeitern vollautomatisiert SOFC als Röhren, ein 20 kW Stack wiegt 200 kg. In den Stacks ist die Luft außen und der Brennstoff innen. Energiedichte und Lebensdauer sind gegenläufig. Die Anode basiert auf Nickel, Zr ist der Elektrolyt. Bei Röhren brennt Watt 1x alle Schichten, alle anderen brennen Beschichtung für Beschichtung. Ein Wärmestrom bei 400°C wäre auskoppelbar. Kostendegression: Preis pro kW el. : 10.000-12.000 \$ für Methan; für H<sub>2</sub> geht das auf 3.000\$ runter. Zellkosten sind gering <10% der Systemkosten; Kosten durch die elektrischen Bauteile (60%). Als Nebeninformation wurde mitgeteilt, dass bei PEM allein das Platin 150 USD pro kW kostet.

## 2. Mit einem Verbrennungsmotor

Es gibt in Deutschland seit 10 Jahren Verbrennungsmotoren bei den Firmen BMW und MAN. Der einzige Schadstoff sind Stickoxide, diese können aber sehr leicht mit Wasserstoff umgesetzt werden, viel leichter als mit Harnstoff („AdBlue“). Verbrennungsmotoren haben mit Wasserstoff einen Wirkungsgrad bis zu 42%. Man kann direkt mit dem Motor und einem Getriebe fahren oder mit dem Motor eine Batterie aufladen („Range Extender“). Verbrennungsmotoren liefern die notwendige Wärme für die Freisetzung des Wasserstoffs aus dem LOHC. Eine wichtige zu lösende Nebenbedingung ist die schlechte volumetrische Energiedichte von gasförmigen Wasserstoff, so dass der Wasserstoff mit ca. 7-10 bar in den Verbrennungsraum verdichtet werden muss. Ein Freisetzer liefert aber nur 1 bar, so dass additiv ein Verdichter notwendig wird, einer für Wasserstoff und einer für Luft. Bild 4.1 zeigt das Prinzip.

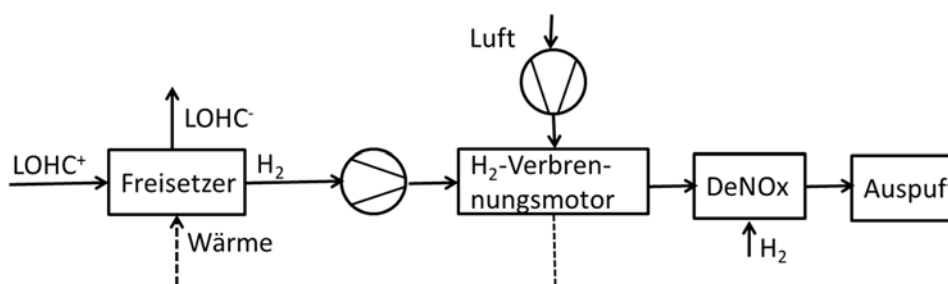


Bild 4.1: Prinzip eines Wasserstoff-Verbrennungsmotors mit Wärmemanagement

Diese Motoren wurden in Fahrzeuge BMW als Hydrogen 7 eingebaut und 100 Stück gefertigt und im öffentlichen Verkehr betrieben. Die DeNOx-Anlage aus Bild 4.1 fehlte. Aber selbst mit DeNOx ist der Motor nicht vollständig Zero Emission, denn es verbrennt immer ein sehr kleiner Teil des Schmieröls an der Kolbenwand. Der Feldversuch wurde 2009 beendet.

Die Fa. MAN in Nürnberg hat Anfang 2000 einen Wasserstoffmotor entwickelt und betrieben. Danach wurde der Versuch eingestellt und der Motor an die Firma Adapt Engineering, einer Tochter des TÜV-Nord in Nordhausen verkauft. Inzwischen kooperiert Adapt mit Keyou in Unterschleißheim. In der Fa. Keyou haben sich die Ingenieure von MAN und BMW zusammengeschlossen, um einen Wasserstoffmotor zu entwickeln.

### Vergleich

#### Kosten

Heute kostet 1 kW Antriebsleistung für eine PEM-Brennstoffzelle 3.000€, eine SOFC ist teurer, 1 kW für einen Verbrennungsmotor 60€. Auch wenn die Kosten einer Brennstoffzelle sinken, werden sie nicht das Niveau eines Motors erreichen, was aber nach Aussagen der besuchten Firmen nicht wahrscheinlich ist. Die „Economy of scale“ sagt aus, dass ein Produkt billiger wird, wenn es in großen Mengen hergestellt wird. Dies muss aber ingenieurtechnische Gründe haben, die hier nicht sichtbar sind. Insofern ist die Entwicklung der Fa. Nissan nicht erklärlich.

#### Wirkungsgrad

Die Tatsache, dass der Motor die notwendige Wärme bereitstellt, kompensiert die Unterschiede im Wirkungsgrad (Motor bis 42%, Brennstoffzelle um die 50%) und macht den Verbrennungsmotor effektiver.

#### Reparatur

Ein Motor kann an jedem Ort der Welt repariert werden, eine Brennstoffzelle muss an den Hersteller geschickt werden. Bei einem Defekt ist der betroffene Teil der Brennstoffzelle („Stack“) verloren, er wird weggeworfen.

#### Lebensdauer

Ein Motor hält einige 100.000 km, Brennstoffzellen haben diesen Praxistest noch vor sich. Bisher gibt es nur Hoffnung.

### Was ist zu tun?

Prof. Arlt empfiehlt, durch Diskussion mit Herstellern von Bussen heraus zu finden, ob man einen Bus mit einem Motor und einem Getriebe direkt antreiben soll oder den Motor als Range-Extender benutzt. Das ist eine Frage der Kosten.

## 5. Bericht Umsetzung der LOHC-Technologie in Bussen

In Deutschland konnte kein Bushersteller für einen Prototypen gefunden werden. Daher wurde die Evopro-Gruppe/Ikarus Egyedi am 15.1.18 in Budapest besucht.

Die Evopro-Gruppe hat einen Umsatz von 25 Mio. €/a bei 250 Mitarbeitern, davon etwa 20 Verwaltern. Die Evopro Holding ist die Muttergesellschaft von Evopro System Engineering (Automatisierung, Software) und Evopro Innovation (ebenfalls Software, Busfertigung, Ladestationen für Elektro-Autos).

Die Busse werden unter der Marke Modulo verkauft. Die Produktion ist 1 Stück/Tag. Daher gibt Evopro gerne Lizenz an Firmen, die aufgrund der Pläne von Evopro die Busse selber fertigen. Die Standard Buslänge ist 12 m, die Modulo Busse werden auch kürzer gebaut und dann aus GFK (Vinylester plus Glasfaser). Die Länge ergibt sich aus der Zahl der verklebten Zwischenstücke, 8m wird am meisten verlangt. Die GFK-Karosserie ist selbsttragend und wird aus Russland bezogen und bei Evopro zusammengesetzt und mit den Aggregaten versehen (z.B. mit Siemens Mittelmotor). Der 8 m Bus hat eine 141 kWh/600 V Batterie mit 2000 kg Gewicht, die 80.000€ (567 €/kWh) kostet. Durch das geringe Gewicht der Konstruktion ist der Energiebedarf des 8m Busses 60-70 kWh/100 km, daher reicht die Batterieladung für 230-250 km und wird nachts aufgeladen. Die Motorleistung ist 160 kW und 2.000 Nm. Längere Busse haben einen Edelstahlrahmen und werden vor Ort geschweißt.

Aufgrund der Software-Fähigkeiten der Firma sind die Busse softwaretechnisch auf höchstem Stand.

Die Leitung von Evopro ist sehr an einer Kooperation mit Hydrogenious Technologies interessiert.

### Gesprächspartner:

Herr Szigeti, Mark – Leiter Composit Forschung Ikarus Egyedi Kft

Herr Bodnar, Balazs – Direktor Evopro Systems Engineering mit Anteilen an der Holding

Herr Meszaros, Csaba – Inhaber der Evopro Holding

Herr Molnar, Peter – Leiter Busfertigung Evopro Holding Zrt

Herr Dr. Szepessy Zsolt – Leiter Evopro Systems Engineering

### Fazit

Evopro hat das Know-how und die Werkstätten, einen Prototypen zu bauen. Ungeklärt ist die Frage nach der Finanzierung auch für eine ungarische Firma. Evopro hat eine Tochterfirma in Regensburg, Evopro AG mit 65 Mitarbeitern. Diese Tochterfirma könnte Partner des ungarischen Know-how Trägers (evopro Bus Kft.) werden, somit wäre sie berechtigt zum Fahrzeugbau. Sie würde dann die dazu benötigte Karosserie und Bauteile aus Ungarn bekommen und der Zusammenbau würde in Regensburg durchgeführt, wo auch das LOHC-System eingebaut werden könnte.

Aufgrund der schwachen Finanzkraft der beteiligten Firmen wäre eine Förderung von 75% notwendig. Eine SOFC ist heute noch deutlich zu teuer (heute kostet eine 30 kW SOFC so viel wie ein Standard-Bus komplett), der Preis soll auf 200€/kW fallen. Da ist der Autor skeptisch.

# 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](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](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](https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/TransportVerkehr/Querschnitt/BroschuereVerkehrBlick0080006139004.pdf?__blob=publicationFile)
- [5] 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](http://www.dlr.de/dlr/Portaldata/1/Resources/documents/2016/PDF_Shell_Nutzfahrzeugstudie_2016.pdf)
- [6] Benjamin Müller, Karsten Müller, Daniel Teichmann, Wolfgang Arlt, *Chemie Ingenieur Technik* **2011**, 83 (11), 2002-2013.
- [7] Karsten Müller, Jin Geng, Wolfgang Arlt, *Energy Technology* **2013**, 1 (1), 42-47.
- [8] Burkhard Eberwein, in *Präsentation bei Keyou GmbH*, HyFLEET:CUTE, Nordhausen **2017**.