

Wasserstofflogistik mittels flüssigen organischen Wasserstoffträgern (LOHC) – die flüssige Pfandflasche für unsere Energie

Dr. Michael Geißelbrecht, Dr. Franziska Auer, Stephan Kiermaier, Guido Jansen, Prof. Dr. Peter Wasserscheid

Vorspann

Wasserstoff ist das am häufigsten vorkommende Element im Universum. Gleichzeitig ist er auch das leichteste Element und bezogen auf seine Masse sehr energiereich: Der gravimetrische Energieinhalt von Wasserstoff ist dreimal so hoch wie der von Benzin. Eine Erzeugung ist rein aus erneuerbaren Energiequellen möglich. Wasserstoff ist also einer der vielversprechendsten Energieträger für unsere Zukunft. Doch es gibt auch einige Herausforderungen beim Transport und der Lagerung des Elements, wie zum Beispiel Sicherheit, Konversions- und Lagerverluste und das Fehlen notwendiger Infrastruktur. Die Wasserstofflogistik mittels flüssiger organischer Wasserstoffträger (engl. *liquid organic hydrogen carriers*, LOHCs) stellt hier einen vielversprechenden Lösungsansatz dar: Ähnlich dem Prinzip einer Pfandflasche kann das Trägeröl den Wasserstoff aufnehmen, sicher verwahren und bei Bedarf wieder abgeben.

Text

Grundlagen der LOHC-Technologie

Der russische Angriffskrieg in der Ukraine ist im Moment neben der Klimakrise eines der beherrschenden Themen in den Medien. Weil die europäischen Staaten die Ukraine unterstützen, hat Russland die Gaslieferungen nach Europa reduziert und so stiegen der Preis für Erdgas und damit die Energiekosten sprunghaft an. Das hat Europa und insbesondere Deutschland hart getroffen, da wir einen Großteil des benötigten Erdgases aus Russland bezogen haben. Die gestiegenen Energiekosten waren 2022 eine der Hauptursachen für die höchste Inflationsrate in Deutschland seit Beginn der Aufzeichnung des Statistischen Bundesamtes im Jahr 1950. Daran hat sich gezeigt, dass die Nutzung fossiler Energieträger nicht nur verheerende Folgen für unser Klima hat, sondern auch zu gefährlichen Abhängigkeiten geführt hat. Eine Alternative zu Erdgas stellt Wasserstoff dar. Wasserstoff kann mittels Elektrolyse aus Wasser unter Einsatz von erneuerbarem Strom produziert werden. Bei der Nutzung von Wasserstoff zur Wärme- oder Stromerzeugung wird neben Wasserstoff ausschließlich Luft benötigt. Als Produkt der Verstromung bleibt Wasser übrig. Im Gegensatz zu fossilen Energieträgern wird kein klimawirksames Gas wie CO₂ freigesetzt.

Wasserstoff ist das leichteste Element des Periodensystems und liegt bei Umgebungsbedingungen gasförmig vor. Wasserstoff besitzt die höchste gravimetrische Energiedichte aller Stoffe (120 MJ/kg); das heißt in einem Kilogramm ist die meiste Energie gespeichert. Aufgrund des bei Umgebungsbedingungen gasförmigen Aggregatzustandes ist die volumetrische Energiedichte um mehrere Größenordnungen geringer als die volumetrische Energiedichte von konventionellen Energieträgern. So ist in einem Liter Wasserstoff bei Umgebungsbedingungen eine Energie von 0,0108 MJ gespeichert, in einem Liter Diesel jedoch 35 MJ. Mit diesem Beispiel wird klar, dass spezielle Verfahren notwendig sind, um die volumetrische Speicherdichte von Wasserstoff zu erhöhen. [1]

Ein etabliertes Verfahren ist die Kompression des Wasserstoffs auf einen Druck größer 200 bar. So liegt die Energiedichte für Wasserstoff bei 700 bar bei 5,6 MJ/L. In diesem Verfahren muss jedoch ein

Teil der im Wasserstoff enthaltenen Energie für die Kompression aufgewendet werden. Aufgrund des hohen Drucks werden zudem hohe Anforderungen an den Tankbehälter gestellt. Zusätzlich müsste bei einem verstärkten Markthochlauf von Druckwasserstofftechnologien eine komplette Infrastruktur für den Transport von Druckwasserstoff aufgebaut werden. Eine andere Möglichkeit, die volumetrische Energiedichte von Wasserstoff zu erhöhen, ist das Verflüssigen durch Abkühlung auf eine Temperatur unter -253 °C . So kann die Energiedichte auf $10,1\text{ MJ/L}$ gesteigert werden. Allerdings muss auch hier eine erhebliche Energiemenge in die Verflüssigung investiert werden. Weiterhin wäre ebenfalls der Aufbau einer komplett neuen Infrastruktur zur Verteilung von Flüssigwasserstoff notwendig. Darüber hinaus muss mit sogenannten Boil-off Verlusten des Wasserstoffs im Bereich von $0,1 - 1\text{ %}$ des Tankinhalts pro Tag gerechnet werden, weil der verflüssigte Wasserstoff verdampft. [1]

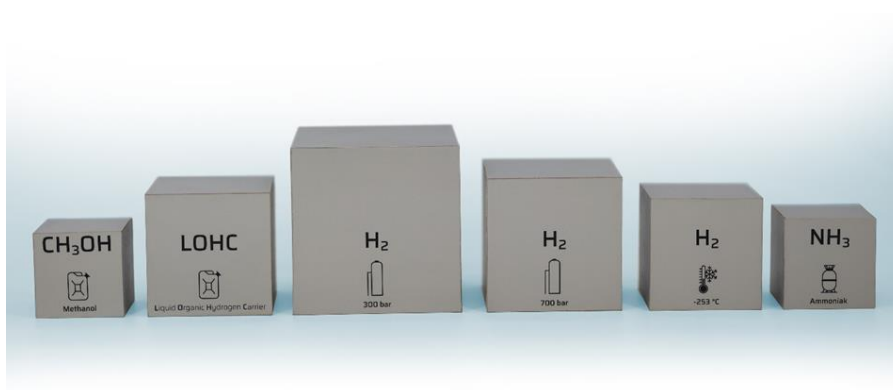


Abbildung 1: Ein Vergleich: So stark wird ein Kubikmeter Wasserstoff mit verschiedenen Speichermethoden komprimiert. Die Kantenlänge des größten Quaders, der auf 300 bar komprimierten Wasserstoff veranschaulicht, ist 15,5 Zentimeter.
Foto: Forschungszentrum Jülich/Jansen

Mittels der LOHC-Technologie (engl. *liquid organic hydrogen carrier*; flüssiger organischer Wasserstoffträger) kann Wasserstoff sicher und effizient gespeichert und transportiert werden. Die Speicherung des Wasserstoffs erfolgt anhand einer reversiblen Reaktion mit einer organischen Trägerflüssigkeit. Die Beladung des Trägers geschieht mit der sogenannten Hydrierung. Dabei reagiert der wasserstoffarme Träger mit Wasserstoff an einem Katalysator in einem geeigneten Reaktionsapparat bei erhöhtem Druck und erhöhter Temperatur. In der Reaktion wird die wasserstoffreiche Trägerflüssigkeit gebildet. Da die Hydrierung Wärme erzeugt, also exotherm ist, muss die gebildete Reaktionswärme aus dem Reaktor abgeführt werden. Die wasserstoffreiche Flüssigkeit kann nun bei Umgebungsbedingungen sicher gelagert werden. Die Energiedichte des im LOHC-System gebundenen Wasserstoffs beträgt für das Beispiel des Stoffpaares Benzyltoluol (H0-BT) / Perhydro-Benzyltoluol (H12-BT) $6,5\text{ MJ/L}$. Während des Lagervorgangs treten bei der Wasserstoffspeicherung mittels der LOHC-Technologie keine Speicherverluste auf. Weiterhin kann die bereits bestehende Infrastruktur zur Lagerung und Verteilung fossiler Energieträger auch für die LOHC-Technologie genutzt werden, da das LOHC-System ebenfalls aus Kohlenwasserstoff-Komponenten besteht. Wenn der Wasserstoff benötigt wird, muss die wasserstoffreiche Trägerflüssigkeit in einem geeigneten Reaktionsapparat bei leicht erhöhtem Druck und erhöhter Temperatur in Kontakt mit einem Katalysator gebracht werden. Damit die Wasserstofffreisetzung abläuft, muss dem Apparat Wärme zugeführt werden. Der Wärmebedarf entspricht bilanziell der Wärmeabfuhr aus der Hydrierung. In der Dehydrierung wird neben Wasserstoff wieder die wasserstoffarme Trägerflüssigkeit gebildet und steht für einen weiteren Speicherzyklus zur Verfügung.

Die Trägerflüssigkeit dient also als eine Art Pfandflasche, um den Wasserstoff zu speichern. Der LOHC-Speicherzyklus ist anhand des LOHC-Systems H0-BT/H12-BT in Abbildung 2 aufgezeigt. [2–4]

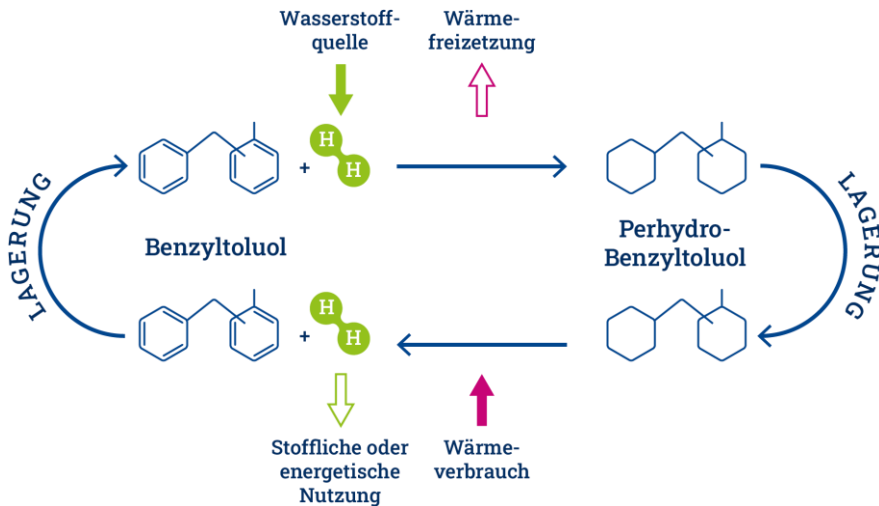


Abbildung 2: Darstellung des Speicherzyklus zur Wasserstoffspeicherung mittels der LOHC-Technologie.

In der Literatur werden verschiedene LOHC-Systeme diskutiert. [3, 5, 6] Ein LOHC-System zeichnet sich im Idealfall durch eine hohe Wasserstoffspeicherkapazität aus, es lässt sich mit hohen Reaktionsgeschwindigkeiten hydrieren und dehydrieren, es besitzt einen niedrigen Schmelz- und hohen Siedepunkt, geringe Toxizität und eine gute kommerzielle Verfügbarkeit zu geringen Preisen. Das LOHC-System H0-BT/ H12-BT erfüllt diese Eigenschaften gut. In der wasserstoffarmen Form ist H0-BT seit Jahrzehnten als Thermalöl industriell im Einsatz und zu akzeptablen Preisen in großem Maßstab verfügbar. Das LOHC-System besitzt einen Schmelzpunkt kleiner -30 °C sowohl in der wasserstoffreichen als auch in der wasserstoffarmen Form. [7] Durch den niedrigen Schmelzpunkt und die geringe Viskosität auch bei geringen Temperaturen kann das LOHC-System H0-BT/ H12-BT selbst in kalten Gegenden ohne Begleitheizung gelagert und effektiv gepumpt werden. [8] Ein Siedepunkt zwischen 260 und 290 °C erlaubt eine einfache Trennung zwischen dem freigesetzten Wasserstoff und den flüssigen LOHC-Komponenten. [9] Eine hohe Aktivität in der Hydrierung und der Dehydrierung des LOHC-Systems H0-BT/ H12-BT bei sehr hoher Selektivität konnte durch Rüde et al. jüngst in einer Studie gezeigt werden. [10] Aus diesen Gründen fokussiert sich die LOHC-Forschung am Forschungszentrum Jülich auf das LOHC-System H0-BT/ H12-BT. Die Hydrogenious LOHC Technologies GmbH verfolgt die Kommerzialisierung der LOHC-Technologie auf Basis der gleichen Technologie. [11]

Im Nachfolgenden werden verschiedene Einsatzgebiete der LOHC-Technologie vorgestellt und diskutiert.

LOHC-Systeme in der Gebäudetechnik

Der aus dem beladenen LOHC-Material freigesetzte Wasserstoff kann in einem geeigneten Gerät zu Strom zurückgewandelt werden und dann z.B. private und öffentliche Gebäude, Elektromotoren von PKWs, Nutzfahrzeugen, Zügen und Schiffen oder industrielle Standorte mit Strom versorgen. [2] Für diese Rückverstromung können Verbrennungsmotoren, Gasturbinen oder Brennstoffzellen genutzt werden. [1, 12] Verbrennungsmotoren und Gasturbinen benötigen jedoch zusätzlich einen

nachgeschalteten Generator, sie haben einen höheren Wartungsaufwand und weisen gesamt betrachtet einen niedrigen Wirkungsgrad auf als die Brennstoffzelle. [13] In einer Brennstoffzelle wird die in chemischer Form gespeicherte Energie in nur einem Gerät bei einem Wirkungsgrad von typischerweise 60 % in Strom umgewandelt. [13]

Unter diesen Wasserstoff-Strom-Wandlern sind die sogenannten Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzellen (engl. Polymer electrolyte fuel cell, PEFC) am weitesten verbreitet und lassen sich beispielsweise in Brennstoffzellenfahrzeugen finden. [14] Diese Klasse wird anhand der Betriebstemperatur in Niedertemperatur- ($T < 80\text{ }^{\circ}\text{C}$) und Hochtemperatur-Systeme ($T = 160 - 220\text{ }^{\circ}\text{C}$) unterteilt. Außerdem gibt es sogenannte Schmelzkarbonatbrennstoffzellen (engl. Molten Carbonate Fuel Cell, MCFC) und Festoxidbrennstoffzellen (engl. solid oxide fuel cell, SOFC). Letztere werden bei Temperaturen zwischen $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ betrieben und haben einen sehr hohen Wirkungsgrad bei der Umwandlung von Wasserstoff in Strom und nutzbare Wärme. [15, 16] Darüber hinaus können SOFCs nicht nur mit Wasserstoff, sondern auch mit Biomethan oder Erdgas betrieben werden. Nur bei der Verwendung von Erdgas stoßen SOFCs dabei fossiles CO_2 aus. Der schematische Aufbau einer SOFC-Brennstoffzelle ist in Abbildung 3 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** gezeigt.

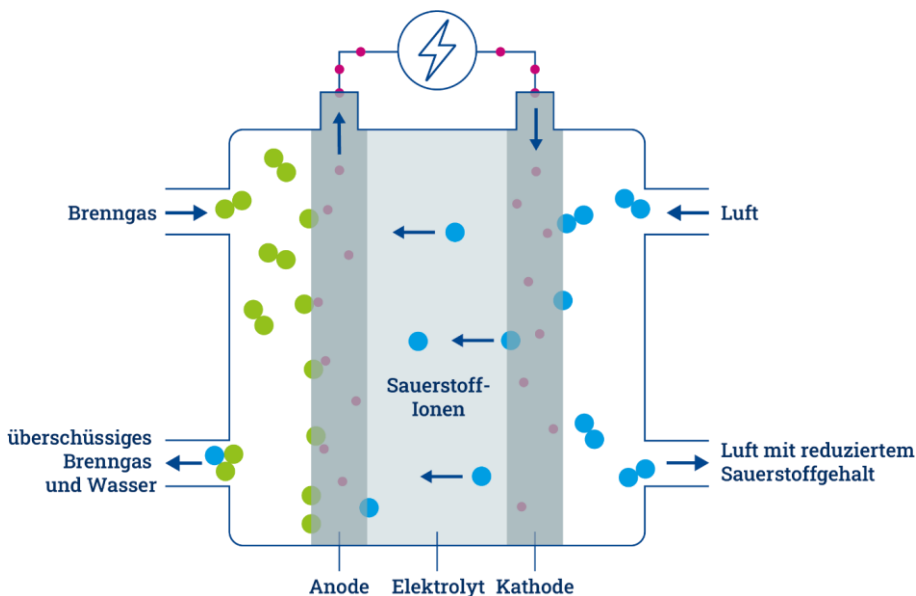


Abbildung 3: Schematischer Aufbau einer SOFC-Brennstoffzelle. [14]

Wie bei allen anderen Prozessen, die chemisch gespeicherte Energie in Strom umwandeln, entstehen bei der Rückverstromung von Wasserstoff in der SOFC-Brennstoffzelle Verluste. [17] Ein quantitatives Maß für diese Verluste stellt der Wirkungsgrad des jeweiligen Energiewandlers dar, der die nutzbare Energiemenge (hier Strom und Wärme aus dem Energiewandler) zur aufgewendeten Energiemenge (hier der Energieinhalt des eingesetzten Wasserstoffs) ins Verhältnis setzt. Die Verluste zeigen sich meist in Form von entstehender Wärme als Folge der Energieumwandlung. Häufig werden SOFC-Brennstoffzellen an Orten eingesetzt, wo nicht nur ein Strom- sondern auch ein Wärmebedarf besteht.

Durch Nutzung der Abwärme der SOFC-Brennstoffzelle kann daher mit diesem Gerät neben dem Strom- auch der Wärmebedarf z.B. in der Gebäudetechnik gedeckt werden. Durch die zusätzliche Wärmenutzung können zu Beginn des Lebenszyklus der Brennstoffzelle sehr hohe Wirkungsgrade von bis zu etwa 85% erreicht werden.

Der für den Betrieb der SOFC-Brennstoffzelle benötigte Wasserstoff kann prinzipiell über eine Pipeline, in Druck- oder Flüssiggastanks oder auch chemisch gebunden über LOHC-Materialien angeliefert werden. [2] Im Falle einer Anlieferung des Wasserstoffs über beladene LOHC-Komponenten wird für die Dehydrierung des beladenen LOHC-Materials Wärme benötigt, während bei der Rückverstromung des Wasserstoffs in der SOFC-Brennstoffzelle Abwärme aufgrund der Wandlungsverluste entsteht. [17] Dies eröffnet die sehr attraktive technische Option, mit einer Wärmekopplung beider Geräte die Abwärme der SOFC-Brennstoffzelle zu nutzen, um den Wärmebedarf der LOHC-Dehydrierung zu decken. Das Institut für nachhaltige Wasserstoffwirtschaft (INW) des Forschungszentrums Jülich demonstriert gerade eine solche Strom- und Wärmeversorgung mittels SOFC- und LOHC-Technologie im Rahmen eines Projektes des Helmholtz-Clusters für nachhaltige und infrastrukturkompatible Wasserstoffwirtschaft (HC-H2): Im Projekt am Krankenhaus Erkelenz wird ein Erdgas-betriebener Gasmotor von einem stationären SOFC-Brennstoffzellenaggregat im 100 kW-Maßstab abgelöst. Der für den Betrieb der SOFC-Brennstoffzelle benötigte Wasserstoff wird in Form von beladenen LOHC-Komponenten angeliefert und im Anschluss mithilfe der Abwärme der SOFC in einem Dehydrierreaktor freigesetzt. Auf diese Weise soll die Strom- und Wärmeversorgung des Krankenhauses nachhaltiger und günstiger gestaltet werden. Ziel der Partner ist es bis 2026 zu zeigen, dass die Hälfte des Energiebedarfs des Krankenhauses mit der erstmaligen Kombination zweier innovativer Wasserstofftechnologien abgedeckt werden kann. Zudem soll die SOFC- und LOHC-Technologie später für weitere Anwendungen qualifiziert und hochskaliert werden. Abbildung 4 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zeigt schematisch die wärmetechnische Verknüpfung einer Abwärme erzeugenden SOFC-Brennstoffzelle mit der Wärme verbrauchenden Dehydrierung von beladenen LOHC-Komponenten.



Abbildung 4: Schematische Darstellung der Wärmekopplung von SOFC-Brennstoffzelle und LOHC-Dehydrierung.

Mit dieser wärmetechnischen Kopplung der beiden Einheiten ist eine effektive Verstromung des LOHC-gebundenen Wasserstoffs realisierbar. In der tatsächlichen Anlage wird die Wärmekopplung durchgeführt, indem die SOFC-Abwärme an eine Flüssigkeit mit hoher Wärmekapazität übergeben wird. Über ein Rohrsystem wird diese Wärme dann in die Freisetzungseinheit geleitet und dort wieder ausgekoppelt. Durch die Kombination von Wasserstoffspeicherung in LOHC-Systemen und der Verstromung in SOFC-Einheiten kann in Zukunft grüner Wasserstoff zunächst kostengünstig mit

Kommentiert [WP1]: Bitte bei Bosch, z.B. Frau Seitz, noch einmal nachfragen. Bzw. noch mal in den Bosch Unterlagen verifizieren.

Kommentiert [JG2R1]: Ist geklärt und stimmt. Ich ergänze das noch um den Hinweis "zu Beginn der Lebensdauer der Brennstoffzelle etwa 85 Prozent."

einem üblichen Tankfahrzeug angeliefert und sicher vor Ort gelagert werden, bevor dieser in der SOFC-Brennstoffzelle zu Strom und Wärme gewandelt wird.

LOHC-Systeme in der Quartiersversorgung

Die Versorgung von Wohnanlagen oder Gewerbeparks mit Strom und Wärme muss zu jeder Tages- und Jahreszeit sichergestellt sein. So muss auch während möglicher Dunkelflauten (Zeiten mit sehr geringer Stromproduktion aus Wind- und Solaranlagen) die Versorgung gesichert sein. Batterien sind dann eine sinnvolle Lösung, wenn Strom dynamisch für kurze Zeiträume gespeichert werden muss, z.B. im Tag-Nacht-Wechsel. Batterien sind jedoch nicht geeignet, um eine saisonale Energiespeicherung zu realisieren, also große Mengen an Energie aus dem sonnenreichen Sommer in den kalten Winter zu bringen, wo großer Heizbedarf besteht. Für eine solche saisonale Energiespeicherung ist dagegen die LOHC-Technologie besonders gut geeignet.

Ziel des Projekts Living Lab Energy Campus (LLEC) am Forschungszentrum Jülich ist der Aufbau eines Reallabors, um Optionen für eine nachhaltige Energieversorgung des Forschungszentrums mit seinen über 7000 Mitarbeitenden zu demonstrieren. Im Rahmen des LLECs werden verschiedene Demonstratoren aus den Bereichen Photovoltaik, Batterie und Wasserstoff im industriell relevanten Maßstab aufgebaut, um die Technologien zu erproben, optimale Betriebsstrategien zu entwickeln und Betriebserfahrungen zu sammeln. Ein Teil des LLEC ist ein sogenannter „One Reactor“ zur saisonalen Energiespeicherung mittels LOHC-Technologie.

Im „One Reactor“-Konzept kann in einem einzigen Reaktionsapparat sowohl die Hydrierung der wasserstoffarmen LOHC-Komponenten als auch die Dehydrierung der wasserstoffreichen LOHC-Komponenten erfolgen. Die Reaktionsrichtung wird nur durch die Anpassung des Reaktionsdrucks realisiert. [18, 19] Das „One Reactor“-Konzept senkt die Investitionskosten für den Aufbau einer saisonalen und stationären Wasserstoffspeicherlösung auf Basis der LOHC-Technologie, da die Anzahl der benötigten Reaktionsapparate reduziert wird. Ebenfalls können Betriebskosten gemindert werden, da der „One Reactor“ im Idealfall immer in Betrieb ist und sich so lange Aufheiz- oder Abkühlzeiten vermeiden lassen. Die Technologie konnte bisher erfolgreich im Pilotmaßstab demonstriert werden. [20] Ein Ziel des LLEC-Projekts ist die Skalierung des Konzepts in einen industriell relevanten Maßstab von 300 kW bezogen auf den unteren Heizwert des freigesetzten Wasserstoffs. Der geplante „One Reactor“ stellt in dieser Leistungsklasse einen weltweit einmaligen Prototypen dar.

Die Dehydrierung ist eine endotherme Reaktion und der Wirkungsgrad der Dehydrierung ist entscheidend von der Bereitstellung der für die Wasserstofffreisetzung notwendigen Wärme abhängig. [21] Die Hydrierung verläuft exotherm und die während der Reaktion freiwerdende Wärme entspricht bilanziell der notwendigen Wärme für die Dehydrierung. [22] Steht ein geeigneter Wärmespeicher zur Verfügung, können mittels der LOHC-Technologie hohe Speicherwirkungsgrade von Wasserstoff zu Wasserstoff von über 90 % erreicht werden. Im LLEC-Projekt soll dieser hohe Speicherwirkungsgrad demonstriert werden. Es steht allerdings kein Wärmespeicher zur Verfügung, sondern die Speicherung der Wärme soll durch die Kopplung mit einem Blockheizkraftwerk erreicht werden. Das Blockheizkraftwerk (BHKW) ist aufgrund des hohen Wärmebedarfs des Forschungszentrums wärmegeführt und so kann die Leistung der Gasmotoren im Hydrierbetrieb des „One Reactors“ reduziert werden, da ein Teil der benötigten Wärme durch die Hydrierung produziert wird und in das Wärmenetz des Forschungszentrums eingekoppelt wird. Diese Wärme wird virtuell gutgeschrieben. Wenn der Wasserstoff in der Dehydrierung aus dem wasserstoffreichen LOHC-Material freigesetzt werden soll, wird Wärme benötigt. Hierfür wird die Leistung der Gasmotoren des BHKWs erhöht. So entsteht durch die Kopplung eines BHKWs mit dem LOHC-Reaktor eine Möglichkeit,

die Abwärme des LOHC-Prozesses virtuell zu speichern. Die Verknüpfung des „One Reactors“ mit dem Wärmenetz des Forschungszentrums und den BHKWs ist in Abbildung 5 skizziert.

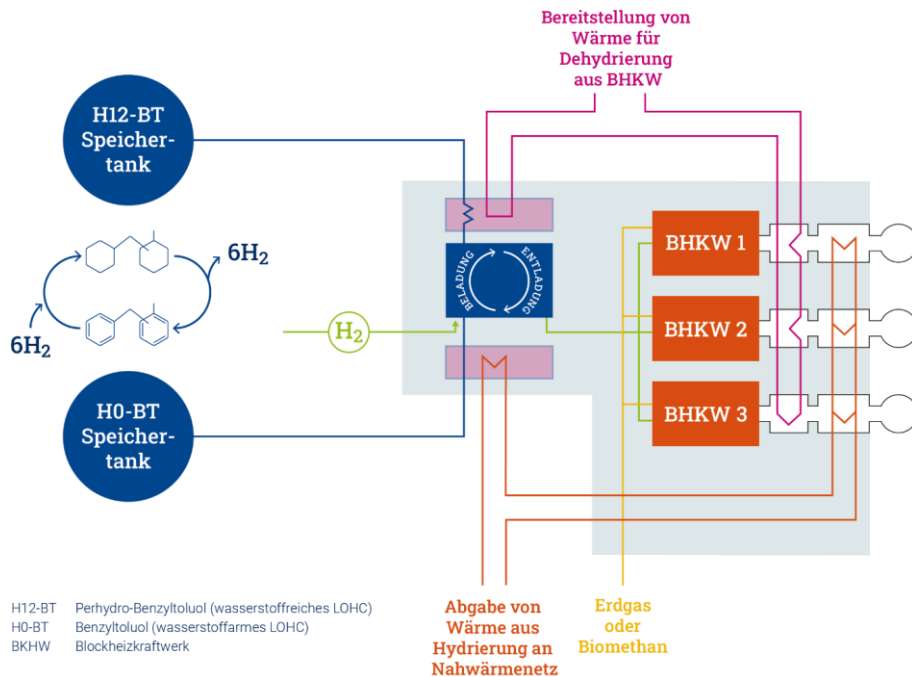


Abbildung 5: Skizzierung der Einbindung des LOHC-Reaktors in die Infrastruktur des Forschungszentrums.

LOHC-Systeme in der Mobilität

Laut einer Mitteilung des Statistischen Bundesamtes [23] machte der Verkehrssektor 2020 21,4 Prozent des Energiebedarfs in Deutschland aus. Deswegen ist auch hier im Rahmen der Energiewende eine umfassende Dekarbonisierung nötig. Generell gelten öffentliche Verkehrsmittel bei der Mehrheit der Bevölkerung als die umweltfreundlichere Fortbewegungsmethode im Vergleich zur Nutzung von PKW. Dies liegt daran, dass in öffentlichen Verkehrsmitteln mehr Personen pro Fahrzeug transportiert werden können und damit der Energieverbrauch bzw. der CO₂-Ausstoß pro Personenkilometer (Pkm) abnimmt. Dieser liegt mit Werten zwischen 37 g/Pkm (öffentlicher Fernverkehr) und 108 g/Pkm (öffentlicher Nahverkehr) deutlich niedriger als der für private PKW (162 g/Pkm). [24] Nichtsdestotrotz verursacht ein Dieselmotor im Zug oder Bus die gleichen Emissionen wie ein Dieselmotor im PKW. Dies erklärt auch den Unterschied in den CO₂-Emissionen zwischen Fern- und Nahverkehr. Während im Fernverkehr der Bahn 99 % der Verkehrsleistung elektrisch erbracht wird, sind es im Nahverkehr der Bahn nur 81 %, der Busverkehr dagegen ist noch ganz überwiegend Diesel-basiert. [25] Insgesamt sind ca. 40 % des Bundesschienennetzes aktuell nicht elektrifiziert. [26] Ein Großteil davon wird voraussichtlich auch in Zukunft nicht elektrifiziert sein, da die Elektrifizierung mit hohen Kosten verbunden ist, die sich nur bei einer entsprechenden Auslastung der Strecke lohnen. Nach Angaben der DB Netz AG liegen die Kosten einer eingleisigen Streckenelektrifizierung bei durchschnittlich 1,4 bis 3,6 Mio. €/km. [27] Darüber hinaus wäre eine Vollelektrifizierung des deutschen Schienennetzes

Kommentiert [WP3]: PW: Ich bin man davon ausgegangen, dass sich die Zahlen nur auf den Bahnverkehr bezogen haben. Dies muss man auch sagen... Bitte überprüfen, ob der von mir abgeänderte Text jetzt sachrichtig ist.

Kommentiert [AF4R3]: Ist richtig.

sehr zeitintensiv. In einer Studie des Umweltbundesamtes [28] wird eine Umsetzungsdauer von 37 Jahren geschätzt. Der Einsatz alternativer Antriebe im Schienenverkehr erscheint deshalb als wichtiger Schritt hin zu einem emissionsarmen oder sogar emissionsfreien Schienenverkehr. Dies gilt insbesondere für Streckenabschnitte in Deutschland, Europa und der Welt, für die eine Elektrifizierung auch in Zukunft nicht wirtschaftlich ist.

Wenn keine Oberleitung vorhanden ist, sind andere Formen der Elektromobilität gefragt. Aktuell stehen hierfür Batterie- und Wasserstoff- bzw. Brennstoffzellenantriebe in Kombination mit einem Elektromotor zur Verfügung. Batterietriebzüge können konventionell unter einer Oberleitung fahren und dort aufgeladen werden. Auf Strecken ohne Oberleitung wird die Energie für den Antrieb aus der Batterie bezogen. Diese reicht für eine Strecke von etwa 80 – 100 km. [29] Bei längeren Strecken ist der Bau von Oberleitungsinselanlagen nötig, die ein zwischenzeitliches Aufladen ermöglichen, was jedoch mit Ausfällen aufgrund von Ladezeiten verbunden ist. In einem Wasserstofftriebzug wird die elektrische Energie von einer Brennstoffzelle, die Wasserstoff verstromt, zur Verfügung gestellt. So können aktuell Reichweiten bis zu 1.200 km erreicht werden. [29] Der Zug emittiert während der Fahrt nur Wasserdampf und Kondenswasser. Für den gasförmigen Treibstoff Wasserstoff müsste jedoch eine völlig neue Betankungsinfrastruktur geschaffen werden, was wiederum mit Kosten und erheblichen Bauzeiten verbunden wäre.

Genau hier bietet erneut der Einsatz von LOHC-Systemen entscheidende Vorteile: Wird der Wasserstoff nicht elementar, sondern chemisch gebunden transportiert, gelagert und getankt, vereinfacht sich das Handling deutlich. Die bestehende Infrastruktur für flüssige Kraftstoffe für die heutigen Diesellokomotiven kann aufgrund der ähnlichen physikalischen Eigenschaften von LOHC-Systemen weiter genutzt werden, wodurch Kosten eingespart werden. Darüber hinaus ermöglicht die Speicherung von Wasserstoff in LOHC-Systemen die kostengünstige Anlieferung über größere Distanzen und die Lagerung deutlich größerer Mengen. Bei der Verwendung von grünem Wasserstoff, der an geeigneten Orten mit regenerativen Energien hergestellt wurde, ergibt sich somit die technologische Aussicht auf eine vollständig CO₂-freie Mobilität auf der Schiene.

Das Helmholtz-Institut Erlangen-Nürnberg (HI ERN), eine Außenstelle des Forschungszentrums Jülich, arbeitet derzeit im Rahmen des vom Bayerischen Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie geförderten Projekts „Erforschung und Entwicklung eines emissionsfreien und stark emissionsreduzierten Antriebssystems am Beispiel des Schienenverkehrs“ an der Entwicklung und dem Bau eines Zug-Demonstrators, welcher mit Wasserstoff aus einem LOHC-System angetrieben wird. [30] Für den Betrieb notwendige Aggregate sind hierbei zwei LOHC-Tankkammern, die Dehydriereinheit zur on-board Freisetzung des gespeicherten Wasserstoffs, eine Wasserstoffaufreinigungseinheit, die Brennstoffzelleneinheit, eine Batteriepuffereinheit zur Rekuperation der Bremsenergie und als elektrischer Zwischenspeicher sowie der elektrische Triebmotor. Das mit Wasserstoff beladene LOHC-System wird hierbei an der Betankungsstation - wie bisher der Dieseltreibstoff - in eine der zwei LOHC-Tankkammern überführt. Während der Fahrt erfolgt die Dehydrierung des LOHC-Systems. Der freigesetzte Wasserstoff wird unmittelbar in der Brennstoffzelleneinheit verstromt und zum Antrieb des Elektromotors verwendet. Das bei der Dehydrierung entstehende unbeladene LOHC-Material gelangt in die zweite Tankkammer und wird dort gelagert. Bei einem erneuten Tankvorgang wird dann zum einen die volle Tankkammer mit dem entladenen LOHC-Material entleert und zum anderen die leere Tankkammer mit beladenem LOHC-Material aufgefüllt. Im Rahmen des Forschungsprojektes sollen die neue Antriebseinheit als „LOHC-Power Pack“ auf einem eigenen Fahrgestell hinter dem Triebwagen angeordnet werden und die Lokomotive mit Fahrstrom versorgen. Der geplante Aufbau ist schematisch in Abbildung 6 dargestellt.

Kommentiert [WP5]: Ich habe die Reihenfolge geändert, damit man den Weg des Wasserstoffs vom Tank bis zur Verstromung nachvollziehen kann...

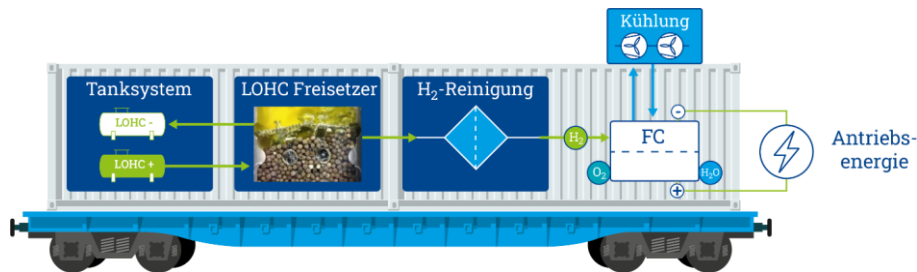


Abbildung 6: Schematische Darstellung des geplanten Aufbaus des „LOHC-Power Packs“ zum Antrieb eines ZugDemonstrators mit Wasserstoff aus einem LOHC-System im Rahmen des vom bayrischen StmWi geförderten Projekts „Erforschung und Entwicklung eines emissionsfreien und stark emissionsreduzierten Antriebssystems am Beispiel des Schienenverkehrs“. Copyright: HI ERN

Eine Herausforderung ist die Wärmebereitstellung für die Dehydrierung im dynamischen Fahrbetrieb. Im Falle des Demonstrators soll diese mit einer Teilverbrennung des freigesetzten Wasserstoffs erfolgen. Hierfür müssen ca. 27 % des Wasserstoffs thermisch genutzt werden. [31] Perspektivisch ist eine Nutzung der Abwärme der Brennstoffzelle zur Versorgung der Dehydriereinheit wünschenswert und entsprechende Entwicklungen sind Gegenstand des Projekts. So wird beispielsweise an einer Absenkung der Dehydriertemperatur unter das Arbeitsniveau einer Hochtemperatur-PEM-Brennstoffzelle (160 - 220 °C) gearbeitet. Aufgrund des begrenzten Raumes und der Bauhöhenbeschränkung für Züge ist eine hohe Leistungsdichte der Dehydriereinheit erforderlich. Hier wird an einem verbesserten Wärmeeintrag in den Dehydrierapparat und an einer Optimierung der eingesetzten Katalysatoren geforscht. Am Beispiel des Zugdemonstrators wird einer der Vorteile der Speicherung von Wasserstoff in LOHC-Systemen sehr deutlich, nämlich die Erhöhung der volumetrischen Speicherdichte gegenüber gasförmigem Wasserstoff. Im Vergleich zu dem Druckgas-versorgten Wasserstoffzug Coradia iLint der Firma Alstom, bei welchem ein Tankvolumen von 11.000 L für 178 kg H₂ bei 350 bar erforderlich ist, um eine Reichweite von 600 km zu ermöglichen, beträgt das Tankvolumen für die Bereitstellung derselben Wasserstoffmenge aus dem LOHC-System nur 3.220 - 5.800 L, je nach Entladungsgrad und Beheizungsoption. [31]

Take-Home-Message

Die LOHC-Technologie ermöglicht eine sichere und kostengünstige Handhabung von Wasserstoff in der bestehenden Kraftstoff-Infrastruktur. Die Technologie kann einen wichtigen Beitrag leisten, um einen wirtschaftlichen Einsatz von Wasserstoff im Gebäude-, Mobilitäts-, Energie- und Produktionssektor zeitnah zu ermöglichen.

Zusammenfassung

Liquid Organic Hydrogen Carrier (LOHCs) stellen eine vielversprechende Alternative zur Speicherung und zum Transport des grünen Energieträgers Wasserstoff dar. Gegenüber den herkömmlichen Verfahren, wie Kompression und Verflüssigung, bietet die LOHC-Technologie Vorteile in Bezug auf Sicherheit und Verlustfreiheit bei vergleichbarer volumetrischer Energiedichte. Durch reversible chemische Bindung des Wasserstoffs in der LOHC-Trägerflüssigkeit kann diese als flüssige Pfandflasche

angesehen werden. Die Einspeicherung und Freisetzung erfolgen dabei jeweils über eine chemische Reaktion. Im vorliegenden Artikel werden verschiedene Anwendungsszenarien der LOHC-Technologie und damit zusammenhängende, aktuelle Projekte vorgestellt. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Versorgung von Gebäuden mit Strom und Wärme über eine Verknüpfung von LOHC-Dehydrierung und einer Festoxidbrennstoffzelle (SOFC) realisiert werden kann. Die klimaneutrale Versorgung von Gewerbeparks kann durch Einbindung eines saisonalen LOHC-Speichers in ein bestehendes Wärmenetz verbessert werden. Die Kopplung mit einem Blockheizkraftwerk ermöglicht dabei die Nutzung aller Wärmeströme und einen hohen Speicherwirkungsgrad. Darüber hinaus kann die LOHC-Technologie zur Realisierung eines sicheren, günstigen und emissionsfreien Bahnverkehrs auf nicht-elektrifizierten Strecken beitragen. Im Gegensatz zur Nutzung von gasförmigem Wasserstoff als Treibstoff kann bei der Betankung von Zügen mit dem flüssigen LOHC-Speichermedium die bestehende Infrastruktur für Diesel genutzt werden.

Summary

Liquid Organic Hydrogen Carriers (LOHCs) represent a promising alternative for the storage and transport of the green energy carrier hydrogen. Compared to conventional methods, such as compression and liquefaction, the LOHC technology offers advantages in terms of safety and loss-free storage at comparable volumetric energy density. Due to reversible chemical bonding of the hydrogen in the LOHC fluid, the latter can be regarded as a liquid returnable bottle. The storage and release take place in each case via a chemical reaction. In this article, various application scenarios of the LOHC technology and related current projects are presented. In summary, it can be stated that the supply of buildings with electricity and heat can be realised by combining LOHC dehydrogenation and a solid oxide fuel cell (SOFC). The climate-neutral supply of industrial parks can be improved by integrating a seasonal LOHC storage system into an existing heating network. The coupling with a combined heat and power plant enables the use of all heat flows and a high storage efficiency. In addition, the LOHC technology can contribute to the realisation of safe, cheap and emission-free rail transport on non-electrified lines. In contrast to the use of gaseous hydrogen as fuel, the existing infrastructure for diesel can be further used for refuelling trains with the liquid LOHC storage medium.

Danksagung

Die Arbeiten wurden durch das Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie durch das Projekt "Emissionsfreier und stark emissionsreduzierter Bahnverkehr auf nicht-elektrifizierten Strecken", durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) durch das Projekt „Saisonale Speicherung in gekoppelten, regenerativen Energiesystemen mittels Power-to-Gas (P2G)“ und im Rahmen des Helmholtz-Programms "Materialien und Technologien für die Energiewende" im Themenbereich "Chemische Energieträger" und dem Unterthema "Strombasierte Kraftstoffe und Chemikalien" finanziert. Weiter finanziert das BMBF die Arbeit und die Projekte des Helmholtz-Clusters für nachhaltige und infrastrukturkompatible Wasserstoffwirtschaft (HC-H2) im Rahmen des Strukturstärkungsgesetzes. Das Projekt am Krankenhaus Erkelenz ist als erstes HC-H2-Demonstrationsvorhaben gestartet.

Schlagwörter

Wasserstoff, Energie, Wasserstoffträger, Speicherung, Transport, Mobilität, Wärme, erneuerbare Energien

Literatur

- [1] P. Preuster, A. Alekseev, P. Wasserscheid, *Annual review of chemical and biomolecular engineering* **2017**, *8*, 445 – 471.
- [2] D. Teichmann, W. Arlt, P. Wasserscheid, R. Freymann, *Energy & Environmental Science* **2011**, *4* (8), 2767 – 2773.
- [3] P. Preuster, C. Papp, P. Wasserscheid, *Accounts of chemical research* **2017**, *50* (1), 74 – 85.
- [4] N. Brückner, K. Obesser, A. Bösmann, D. Teichmann, W. Arlt, J. Dungs, P. Wasserscheid, *ChemSusChem* **2014**, *7* (1), 229 – 235.
- [5] P. T. Aakko-Saksa, C. Cook, J. Kiviaho, T. Repo, *Journal of Power Sources* **2018**, *396*, 803 – 823.
- [6] M. Niermann, A. Beckendorff, M. Kaltschmitt, K. Bonhoff, *International Journal of Hydrogen Energy* **2019**, *44* (13), 6631 – 6654.
- [7] Datenblatt Marlotherm LH, https://ws.eastman.com/ProductCatalogApps/PageControllers/MSDSShow_PC.aspx **abgerufen am 2023**.
- [8] K. Müller, K. Stark, V. N. Emel'yanenko, M. A. Varfolomeev, D. H. Zaitsau, E. Shoifet, C. Schick, S. P. Verevkin, W. Arlt, *Industrial & Engineering Chemistry Research* **2015**, *54* (32), 7967 – 7976.
- [9] H. Jorschick, M. Geißelbrecht, M. Eßl, P. Preuster, A. Bösmann, P. Wasserscheid, *International Journal of Hydrogen Energy* **2020**, *45* (29), 14897 – 14906.
- [10] T. Rüde, S. Dürr, P. Preuster, M. Wolf, P. Wasserscheid, *Sustainable Energy & Fuels* **2022**, *6* (6), 1541 – 1553.
- [11] Hydrogenious LOHC Technologies GmbH, <https://hydrogenious.net/> **abgerufen am 2023**.
- [12] G. SCHERER, *International Journal of Hydrogen Energy* **1998**, *23* (1), 19 – 25.
DOI: 10.1016/S0360-3199(97)00018-9.
- [13] A. Züttel, A. Remhof, A. Borgschulte, O. Friedrichs, *Philosophical Transactions of The Royal Society A Mathematical Physical and Engineering Sciences* **2010**, *368* (1923), 3329 – 3342.
DOI: 10.1098/rsta.2010.0113.
- [14] *High Temperature Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells: Approaches, Status, and Perspectives*, 1st ed. (Eds: Q. Li, D. Aili, H. A. Hjuler, J. O. Jensen), Springer International Publishing, Cham **2016**.
- [15] L. Blum, R. Deja, R. Peters, D. Stolten, *International Journal of Hydrogen Energy* **2011**, *36* (17), 11056 – 11067. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2011.05.122.
- [16] R. Peters, R. Deja, L. Blum, J. Pennanen, J. Kiviaho, T. Hakala, *International Journal of Hydrogen Energy* **2013**, *38* (16), 6809 – 6820. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2013.03.110.
- [17] P. Preuster, Q. Fang, R. Peters, R. Deja, N. van Nguyen, L. Blum, D. Stolten, P. Wasserscheid, *International Journal of Hydrogen Energy* **2018**, *43* (3), 1758 – 1768.
DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.11.054.
- [18] H. Jorschick, P. Preuster, S. Dürr, A. Seidel, K. Müller, A. Bösmann, P. Wasserscheid, *Energy & Environmental Science* **2017**, *10* (7), 1652 – 1659.
- [19] H. Jorschick, S. Dürr, P. Preuster, A. Bösmann, P. Wasserscheid, *Energy technology* **2019**, *7* (1), 146 – 152.
- [20] J. Geiling, M. Steinberger, F. Ortner, R. Seyfried, A. Nuss, F. Uhrig, C. Lange, R. Öchsner, P. Wasserscheid, M. März, *International Journal of Hydrogen Energy* **2021**, *46* (72), 35662 – 35677.

- [21] K. Müller, S. Thiele, P. Wasserscheid, *Energy & fuels* **2019**, 33 (10), 10324 – 10330.
- [22] K. Müller, K. Stark, V. N. Emel'yanenko, M. A. Varfolomeev, D. H. Zaitsau, E. Shoifet, C. Schick, S. P. Verevkin, W. Arlt, *Industrial & Engineering Chemistry Research* **2015**, 54 (32), 7967 – 7976.
- [23] Statistisches Bundesamt, Destatis, *Energieverbrauch im Verkehr 2020 um ein Fünftel gesunken* **2022**.
- [24] Umweltbundesamt, *TREMOD 6.42*, <https://www.umweltbundesamt.de/bild/vergleich-der-durchschnittlichen-emissionen-0> **2022**.
- [25] Allianz pro Schiene, *Elektromobilität: Die Mobilität von morgen schon heute auf der Schiene: E-Mobilität bei der Eisenbahn*, <https://www.allianz-pro-schiene.de/themen/umwelt/elektromobilitaet/> **2020**.
- [26] Allianz pro Schiene, *Elektrifizierung erklärt: Das Schienennetz muss unter Strom stehen*, <https://www.allianz-pro-schiene.de/themen/infrastruktur/elektrifizierung-bahn/> **2020**.
- [27] Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMVD), *Kostenvergleich: Streckenelektrifizierungen versus Einsatz alternative Antriebe*, <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/E/schiene-aktuell/kostenvergleich-streckenelektrifizierungen-versus-einsatz-alternative-antriebe.html> **2021**.
- [28] M. Holzhey **2010**.
- [29] Allianz pro Schiene, *Ein Überblick: Alternative Antriebe auf der Schiene*, <https://www.allianz-pro-schiene.de/themen/aktuell/innovative-antriebe-auf-der-schiene/> **2022**.
- [30] Helmholtz-Institut Erlangen-Nürnberg, *Das Zugprojekt - mit LOHC emissionsfrei auf die Schiene*, <https://www.hi-ern.de/de/projekte/das-zugprojekt-mit-lohc-emissionsfrei-auf-die-schiene>.
- [31] P. Wasserscheid, T. Grube, D. Sternfeld, M. Essl, M. Robinius, D. Stolten, *Schriften des Forschungszentrums Jülich, Reihe Energie & Umwelt / Energy & Environment* **2019** (453).

Kurzbiografien

Michael Geißelbrecht wurde 1990 in Ansbach geboren. Nach dem Studium des Chemie- und Bioingenieurwesens (2016) und der Promotion in Chemischer Reaktionstechnik (2020) bei Prof. Wasserscheid in Erlangen wechselte er an die Außenstelle „Helmholtz Institut Erlangen Nürnberg für Erneuerbare Energien“, die ein Teil des Forschungszentrum Jülich ist. Hier leitet er das Team „LOHC Verfahrenstechnik“ und forscht mit seinem Team an Themengebieten, die für den großskaligen Einsatz der LOHC-Technologie relevant sind. Schwerpunkte seiner Forschung liegen in der Untersuchung des Einflusses der Qualität der Trägerflüssigkeit auf den Gesamtprozess und auf der Modellierung des LOHC-Prozesses.

Franziska Auer wurde 1993 in Nürnberg geboren und studierte Umwelt- und Bioingenieurwissenschaft an der Universität Bayreuth (2016). Anschließend arbeitete sie am Lehrstuhl für Chemische Reaktionstechnik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg an ihrer Promotion zum Thema „Katalysatorentwicklung für die Dehydrierung von Perhydro-Dibenzyltoluol“, welche sie 2020 abschloss. Aktuell leitet sie am Helmholtz-Institut Erlangen-Nürnberg, einer Außenstelle des Forschungszentrums Jülich, das Team „Aktive Beschichtungen und Katalysatortechnologien“. Zentrales Thema ist hier die Entwicklung aktiver, selektiver und stabiler Katalysatoren für die chemische Wasserstoffspeicherung.

Stephan Kiermaier wurde 1991 in Eggenfelden geboren und studierte Chemie- und Bioingenieurwesen an der Universität Erlangen-Nürnberg. Im Anschluss forschte er am Lehrstuhl für Chemische

Reaktionstechnik in Erlangen im Themenbereich flüssiger organischer Wasserstoffträger (LOHCs). Aktuell arbeitet er als Projektentwickler am Institut für nachhaltige Wasserstofftechnologien des Forschungszentrums Jülich. Dabei beschäftigt er sich mit der Ausgestaltung, der Koordination und der Leitung verschiedener Projekte zur Demonstration innovativer Wasserstofftechnologien im Rahmen des Helmholtz-Clusters für nachhaltige Wasserstoffwirtschaft (HC-H2).

Peter Wasserscheid wurde 1970 in Würzburg geboren und studierte Chemie an der RWTH Aachen. Er promovierte am Institut für Technische Chemie und Petrochemie der RWTH Aachen bei Herrn Prof. Dr. W. Keim. Seit 2003 ist er Lehrstuhlinhaber für Chemische Reaktionstechnik an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Seit 2014 ist er Gründungsdirektor der Außenstelle „Helmholtz Institut Erlangen Nürnberg für Erneuerbare Energien“, die ein Teil des Forschungszentrum Jülich ist. Im Jahr 2021 wurde er zum Gründungsdirektor des Instituts für nachhaltige Wasserstofftechnologien des Forschungszentrums Jülich berufen. Seine Forschung beschäftigt sich mit der Entwicklung neuer Katalysatorkonzepte und innovativer Verfahren zur effektiven Speicherung von Wasserstoff.

Korrespondenzadresse

Abbildungslegenden

Tabellen