

Autoren: Dr. Alexander Seidel
Dr. Martin Schneider
Dr. Caspar Paetz

Datum: 20.02.2020

**Schlussbericht zum Teilvorhaben „FC-B1 – Dezentrale H₂-
Logistik: Speicherung und Verteilung über flüssige
Wasserstoffträger“**

von

Hydrogenious LOHC Technologies GmbH

im

**Verbundvorhaben „P2X: Erforschung, Validierung und
Implementierung von „Power-to-X“ Konzepten“**

Förderkennzeichen: 03SFK2R0

Projektlaufzeit: 01.09.2016 – 31.08.2019

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Die Autoren sind für den Inhalt der Veröffentlichung verantwortlich

Autoren:	Dr. Alexander Seidel Dr. Martin Schneider Dr. Caspar Paetz
Projektleiter	Dr. Caspar Paetz
Datum:	20.02.2020
Revision:	0
Verwendung:	öffentlich
Geprüft:	Sebastian Sander
Freigegeben:	Dr. Caspar Paetz

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzdarstellung.....	4
1.1	Aufgabenstellung.....	4
1.2	Voraussetzungen	5
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens	5
1.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand an den angeknüpft wurde.....	7
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	8
2	Eingehende Darstellung	9
2.1	Ergebnisse der Teilprojekte und Gegenüberstellung der Ziele	9
2.2	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	15
2.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	15
2.4	Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans	16
2.5	Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	19

1 Kurzdarstellung

1.1 Aufgabenstellung

Ziel des Kopernikus-Verbundprojektes war es, Lösungen zu erarbeiten, mit denen unter Einsatz erneuerbarer Energien stoffliche Energieträger zeitlich flexibel und auf die gesellschaftlichen Bedürfnisse abgestimmt produziert werden können. Es sollte insbesondere der Aspekt der Sektorenkopplung im Mittelpunkt stehen. In der Projektphase I wurden in sechs Forschungsclustern vor allem wissenschaftlich-technische Konzepte beforscht und weiterentwickelt. Thema des Teilvorhabens B1 war die Wasserstoffspeicherung, -freisetzung und -distribution mittels LOHC (*liquid organic hydrogen carrier*). Wasserstoff nimmt unter den Power-to-X Technologien eine zentrale und gewichtige Rolle ein. Die LOHC-Technologie stellt dabei eine neue technische Möglichkeit zur effizienten Speicherung von Wasserstoff dar. Diese Wasserstoffspeichertechnologie bietet Vorteile für die stationäre Energiespeicherung, den Transport regenerativer Energie und neue Formen der Mobilität. Da sich die Trägerflüssigkeit Dibenzyltoluol problemlos wie ein heutiger Kraftstoff handhaben lässt, kann dafür die vorhandene und bewährte Infrastruktur an Tankschiffen, Kessel- und Tankwagen sowie Tankstellen genutzt werden. Die größten ökonomischen Potenziale bei gleichbleibend hoher positiver ökologischer Auswirkung ergeben sich konkret bei der regenerativen Erzeugung von Wasserstoff durch die Elektrolyse und der anschließenden stofflichen Nutzung des Wasserstoffs an Wasserstofftankstellen oder in der chemischen Industrie.

Zur Erreichung des übergeordneten Ziels sollten vor allem die Verfahren zur Hydrierung und Dehydrierung also zur Ein- und Ausspeicherung des Wasserstoffs optimiert werden. Für beide Verfahren existierten bereits funktionierende Katalysatorsysteme, jedoch waren diese noch nicht speziell auf das Reaktionssystem angepasst. Auf diesem Gebiet sollten mit den Partnern FAU und Clariant verbesserte Systeme entwickelt werden. Im Hinblick auf das Kreislaufsystem der LOHC-Technologie soll durch optimierte Katalysatoren vor allem die Zyklenstabilität des LOHCs erhöht werden.

In der Hydrierung sollte zudem insbesondere die volumenbezogene Produktivität der Katalysatoren und Reaktoren erhöht werden. Darüber hinaus ergeben sich durch die Erhöhung der Reaktionstemperatur über 250 °C deutlich größere Abwärmenutzungspotenziale aus der Reaktionsenthalpie der exothermen Hydrierung. Aus diesem Grund sollten die Katalysatoren speziell für höhere Temperaturen designed werden. Auf Basis eines geeigneten Katalysatorsystems für die Hydrierung bei hohen Temperaturen, sollten Auslegungsgrundlagen für die großtechnische Hydrierung ermittelt werden.

Durch die konkreten Anwendungsszenarien für die Verwendung des freigesetzten Wasserstoffs aus der Dehydrierung, ergeben sich besondere Anforderungen an die Dehydrierreaktion und die Freisetzungsanlage. So müssen zum einen für die Wasserstofftankstelle Normen zur Wasserstoffreinheit, wie beispielsweise ISO/TS 14687-2 eingehalten werden, zum anderen müssen Anforderungen hinsichtlich Freisetzungsdynamik, Wärme- und Strombedarf berücksichtigt werden. Dahingehendes Ziel war es die Dehydrierung bezüglich Wasserstoffreinheit, Freisetzungsrate und Wärmebedarf zu charakterisieren und diese Ergebnisse in ein Basic-Engineering einer LOHC-basierten Wasserstofftankstelle einfließen zu lassen.

1.2 Voraussetzungen

Die Grundlagen der auf Dibenzyltoluol basierenden LOHC-Technologie wurden an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU) durch die Arbeiten in der Gruppe von Herrn Prof. Wasserscheid geschaffen. Hydrogenious LOHC Technologies GmbH (HLT) als Ausgründung der FAU fußt auf diesen Erkenntnissen und entwickelt und vertreibt seitdem technische Systeme zur Speicherung und Freisetzung von Wasserstoff aus LOHCs. Erste Pilotprojekte konnten bereits am Fraunhofer IAO in Stuttgart und in den USA mit dem Partner United Hydrogen realisiert werden, wobei die Leistungsklasse dieser Systeme bei etwa 100 kW liegt.

Hydrogenious LOHC Technologies bestand zu Beginn des Projekts aus etwa 20 Mitarbeitern, welche zum größten Teil im Technikbereich beschäftigt waren. Innerhalb des Unternehmens sind die verschiedensten Gewerke vertreten, welche das nötige Know-How zur Bearbeitung des Projekts mitbringen. Zur Bearbeitung des Projektes wurden vor allem Akademiker aus dem Fachbereich der Reaktionstechnik und Verfahrenstechnik, sowie Techniker zum Aufbau und Betrieb der Testanlagen benötigt.

Durch den Aufbau interner Technikums- und Laboranlagen zur Hydrierung und Dehydrierung von LOHCs, wurde am Standort in Erlangen eine Infrastruktur geschaffen, die es erlaubt schnell und effizient neue Erkenntnisse aus dem Bereich der LOHC-Forschung zu generieren und diese in die aktuellen Entwicklungsarbeiten einfließen zu lassen.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Hydrogenious LOHC Technologies war im Gesamtvorhaben maßgeblich in den vier folgenden Arbeitspaketen beteiligt:

AP1: Optimierung des LOHC-Hydrierverfahrens für Großanlagen

Das Ziel des Arbeitspaketes war es, die Grundlagen für den großtechnischen Einsatz der LOHC-Hydrierung zu schaffen. Das Arbeitspaket unterteilte sich vor allem in die Bereiche Prozessentwicklung, Katalysatorentwicklung und Apparateentwicklung. Hydrogenious LOHC Technologies war hierbei für die Tests der entwickelten Katalysatoren und der Ableitung der Reaktorauslegung auf Basis der Kinetik eingeplant. Insbesondere der Aspekt Hochtemperaturhydrierung sollte näher betrachtet werden.

AP3: Optimierung der Dehydrierung

Das Ziel des Arbeitspakets war die katalytische Dehydrierung von perhydro-Dibenzyltoluol und die entsprechenden Apparate für einen Einsatz an einer Wasserstofftankstelle oder einem industriellen Standort zu optimieren. Das Arbeitspaket untergliederte sich in die Aspekte Katalysatorentwicklung, Reaktorkonzepte, H₂-Trennverfahren und Auslegung der konventionellen Apparate. Hydrogenious LOHC Technologies war für die Katalysatortests, den Test einer Membrantrenneinheit, sowie die Bewertung der Reaktorkonzepte eingeplant.

AP4: Optimierung der Kombination Dehydrierer/ Kompressor/ Pufferspeicher

Ziel des Arbeitspaketes war es, die aus Arbeitspaket 2 gewonnenen Erkenntnisse in ein LOHC-Tankstellen Szenario einfließen zu lassen und dieses hinsichtlich Energieeffizienz, Systemdynamik, Systemstabilität

und Wasserstoffreinheit zu optimieren. Hydrogenious' Aufgabe sollte vor allem darin bestehen Validierungsdaten für die Einzelkomponenten zur Verfügung zu stellen, ein entsprechendes H₂-Reinigungskonzept mit der zugehörigen Analytik zu erproben sowie zur Optimierung der Anlagenkonfiguration einer LOHC-Tankstelle beizutragen.

AP5: Wasserstofflogistik in Verbindung mit der Industrie, Transferhydrierung

Das Arbeitspaket hatte zum Ziel die Nutzung von Wasserstoff in der Industrie zu evaluieren. Hydrogenious LOHC Technologies ermittelte in diesem Arbeitspaket das Anwendungspotential der LOHC-Technologie am Standort Heufeld (Clariant).

Den genannten Arbeitspaketen liegt der in Abbildung 1 dargestellte Zeitplan zugrunde.

Arbeitspakete	2016		2017				2018				2019			
	9	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	
AP 1 Optimierung Hydrierung														
AP 1.1 Katalysatorentwicklung														
AP 1.2 Wärmemanagement														
AP 1.3 Auslegungsgrundlagen														
AP 3 Optimierung Dehydrierung														
AP 3.1 Katalysatorentwicklung														
AP 3.2 Evaluierung Reaktorkonzepte														
AP 3.4 Auslegungsgrundlagen														
AP 3.5 Mikro-WT und Mikro-Reaktor														
AP 3.6 Konventionelle Apparate														
AP 3.8 Kombination Membran und andere Apparate														
AP 4 Optimierung Dehydrierer/Kompressor/Speicher														
AP 4.1 Modellierung Einzelkomponenten														
AP 4.2 Einzelvalidierung														
AP 4.3 Reinigungskonzepte und Analytik														
AP 4.5 Optimierung Anlagenkonfiguration LOHC-HRS														
AP 5 Wasserstofflogistik / Transferhydrierung														
AP 5.1 Belieferung Industriestandort Heufeld														

Abbildung 1: Zeitplan des Teilvorhabens „Dezentrale H₂-Logistik: Speicherung und Verteilung über flüssige Wasserstoffträger“ und Darstellung der Arbeits- bzw. Unterarbeitspakete mit Beteiligung von Hydrogenious LOHC Technologies.

Innerhalb der einzelnen Arbeitspakete wurden mehrere Meilensteine und Deliverables definiert. Die Deliverables stellen hierbei wichtige Übergabepunkte an die Konsortialpartner dar. Sie sollen für das stark vernetzte Projekt sicherstellen, dass keine Verzögerungen entstehen und der Projektfortschritt gewährleistet wird. In Tabelle 1 sind die für Hydrogenious LOHC Technologies relevanten Deliverables festgehalten.

Tabelle 1: Übersicht der Milestones und Deliverables mit HT-Beteiligung im Kopernikus-Projekt.

Nr.	AP	Deadline	Titel	Ersteller	Empfänger	Technische Zielparameter
D1.1.1	1.1	Q1/2019	Feedback zur Katalysatorperformance des Hydrierkatalysators unter optimierten Bedingungen	HLT	Clariant	- Daten zur Aktivität sowie Stabilität des von Clariant bereitgestellten Katalysators nach Langzeitbetrieb im Technikumsmaßstab unter optimierten Bedingungen
D3.1.1	3.1	Q2/2017	LOHC-Vorkonditionierungsroutine	HLT	RWTH, KIT	- Routine zur Vorbehandlung von LOHC-H, um verbesserte H ₂ Qualität zu erreichen
D.3.1.2	3.1	Q4/2017	Feedback zur Katalysatorperformance der Dehydrierkatalysatoren	HLT	Clariant	- Daten zur Aktivität sowie Stabilität der von Clariant bereitgestellten Katalysatoren - Ergebnisse zur Zyklusstabilität
D.3.2.1 (M2)	3.2	Q2/2017	Vergleich von Reaktorkonzepten für die Dehydrierung	HLT	FAU	-Vergleich von waagerechtem Rohrreaktor, Plattendehydrierer, sowie HV-Reaktor
D.3.8.3	3.8	Q4/2018	Inbetriebnahmebericht der Membrantrenneinheit	HLT	KIT	- Erste Ergebnisse zur Aufreinigung des Wasserstoffs in einer Membraneinheit
D4.2.1	4.3	Q2/2018	Datenbereitstellung Validierung	HLT	ISE	-Bereitstellung von Daten aus dem Dehydrierreaktor im Technikum
D4.3.1	4.3	Q1/2018	Definition der zu analysierenden Verunreinigungen im Wasserstoff	HLT	Areva H2Gen	-Definition der zu analysierenden Stoffe sowie deren Messbereiche
D4.5.2	2.2 4.4 4.5	11/2018	Betriebs-&Regelstrategie Freeze + Verfahrensschema	HLT, H2Gen, ISE, FAU	ISE	-Bestimmung einer Regel- und Betriebsstrategie für die LOHC-HRS
M3	2.2 4.4 4.5	03/2019	Basic-Engineering Dokument	HLT, H2Gen, ISE, FAU	Alle	Zusammenfassung des LOHC-HRS Basic Engineerings (CAPEX+OPEX) in einem Bericht

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand an den angeknüpft wurde

Das Konzept der Wasserstoffspeicherung in organischen Trägermedien wurde bereits intensiv in den 1980er Jahren am Paul-Scherrer-Institut / Villingen erforscht.¹ Seit 2009 beschäftigten sich mehrere Arbeitsgruppen an der Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg mit dem LOHC Konzept. Anfänglich konzentrierten sich die Arbeiten auf das neuartige Trägermolekül N-Ethylcarbazol.² In den Jahren 2013/14 wurde im Rahmen eines ausgedehnten LOHC-Screenings das Trägermolekül Dibenzyltoluol entdeckt.³ Dieses Stoffsystem weist gegenüber anderen LOHCs starke Vorteile auf, so ist die Trägerflüssigkeit im großen Maßstab verfügbar da sie großindustriell aus Toluol hergestellt wird und als Wärmeträgeröl eingesetzt wird (z.B. Marlotherm SH), zum anderen ist die Flüssigkeit nicht als Gefahrgut klassifiziert und ist über einen weiten Temperaturbereich flüssig (- 30 – 390 °C). Durch den hohen Siedepunkt lässt sich der Wasserstoff, welcher aus der Dehydrierung des beladenen Trägers

¹ Taube, M., & Taube, P. (1981). A liquid organic carrier of hydrogen as a fuel for automobiles. In *Hydrogen Energy Progress* (pp. 1077-1085).

² Teichmann, D., Arlt, W., Wasserscheid, P., & Freymann, R. (2011). A future energy supply based on Liquid Organic Hydrogen Carriers (LOHC). *Energy & Environmental Science*, 4(8), 2767-2773.

³ Brückner, N., Obesser, K., Bösmann, A., Teichmann, D., Arlt, W., Dungs, J., & Wasserscheid, P. (2014). Evaluation of Industrially applied heat-transfer fluids as liquid organic hydrogen carrier systems. *ChemSusChem*, 7(1), 229-235.

Perhydro-Dibenzyltoluol entsteht, leicht physikalisch durch Kondensation abtrennen. Dadurch ergeben sich schon hohe Wasserstoffreinheiten ohne komplexe Reinigungsverfahren.

Bis zum Beginn des Projekts P2X wurden von mehreren Wissenschaftlern Arbeiten im Zusammenhang der Wasserstoffspeicherung mittels des Dibenzyltoluol-Systems veröffentlicht. Diese beschäftigten sich beispielsweise mit den thermodynamischen Grundlagen des Reaktionssystems⁴, dem Reaktionsmechanismus in der Hydrierreaktion⁵, Messmethoden zur Bestimmung des Hydriergrads⁶, der Bestimmung von Stoffdaten⁷ oder der Umweltverträglichkeit des Stoffsystems⁸.

Mit der Gründung von Hydrogenious LOHC Technologies GmbH im Jahre 2013 wurde ein entscheidender Schritt zur technischen Realisierung der Technologie gegangen. Hydrogenious LOHC Technologies hält mittlerweile 31 Patentfamilien im Bereich der Wasserstoffspeicherung mittels flüssigen Wasserstoffträgern.

Bereits im Jahr 2016 wurde die erste auf dem Dibenzyltoluol-System basierende Dehydrieranlage in Container-Bauweise mit einer Leistung von etwa 100 kW_{th} durch Hydrogenious LOHC Technologies gefertigt und am Fraunhofer IAO in Betrieb genommen. Mit der Inbetriebnahme der weltweit ersten ReleaseBox wurde bewiesen, dass das Verfahren vom Labor in den Technikumsmaßstab übertragbar ist. Durch die Integration der Anlage in das örtliche Smart-Grid konnte zudem gezeigt werden, dass die LOHC-Technologie im Kontext der Energiespeicherung einen Beitrag zur Energiewende zu leisten vermag.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die in Abschnitt 1.3 vorgestellten Arbeitspakete wiesen starke Schnittstellen zu den Konsortialpartnern auf, die einer regelmäßigen Abstimmung bedurften. Aus diesem Grund wurden insbesondere im Bereich der Katalyse regelmäßige Arbeitsgruppentreffen auf Bearbeiterebene mit den Partnern von KIT, FAU, RWTH und Clariant durchgeführt.

Mit dem KIT bestand darüber hinaus eine enge Zusammenarbeit beim Thema Wasserstoffaufreinigung mittels Membransystemen.

Im Rahmen der Erstellung des Basic Engineering Dokuments für eine LOHC-Wasserstofftankstelle fanden regelmäßige Arbeitstreffen und Telefonkonferenzen zwischen Hydrogenious LOHC Technologies, ArevaH2Gen, Fraunhofer ISE und den Bearbeitern an der Friedrich-Alexander-

⁴ Müller, K., Stark, K., Emel'yanenko, V. N., Varfolomeev, M. A., Zaitsau, D. H., Shoifet, E., ... & Arlt, W. (2015). Liquid organic hydrogen carriers: thermophysical and thermochemical studies of benzyl-and dibenzyl-toluene derivatives. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 54(32), 7967-7976.

⁵ Do, G., Preuster, P., Aslam, R., Bösmann, A., Müller, K., Arlt, W., & Wasserscheid, P. (2016). Hydrogenation of the liquid organic hydrogen carrier compound dibenzyltoluene—reaction pathway determination by 1 H NMR spectroscopy. *Reaction Chemistry & Engineering*, 1(3), 313-320.

⁶ Müller, K., Aslam, R., Fischer, A., Stark, K., Wasserscheid, P., & Arlt, W. (2016). Experimental assessment of the degree of hydrogen loading for the dibenzyl toluene based LOHC system. *international journal of hydrogen energy*, 41(47), 22097-22103.

⁷ Aslam, R., Müller, K., Müller, M., Koch, M., Wasserscheid, P., & Arlt, W. (2016). Measurement of hydrogen solubility in potential Liquid Organic Hydrogen Carriers. *Journal of chemical & engineering data*, 61(1), 643-649.

⁸ Markiewicz, M., Zhang, Y. Q., Bösmann, A., Brückner, N., Thöming, J., Wasserscheid, P., & Stolte, S. (2015). Environmental and health impact assessment of Liquid Organic Hydrogen Carrier (LOHC) systems—challenges and preliminary results. *Energy & Environmental Science*, 8(3), 1035-1045.

Universität statt. Darüber hinaus bestand mit dem Fraunhofer ISE ein reger Austausch um Validierungsdaten für ein LOHC-Dehydriermodell zu liefern.

Neben den einzelnen Arbeitsgruppentreffen wurde eine jährliche Tagung mit allen Projektpartnern des Verbundprojekts durchgeführt.

2 Eingehende Darstellung

2.1 Ergebnisse der Teilprojekte und Gegenüberstellung der Ziele

Im Folgenden sollen die wesentlichen Ergebnisse der bereits vorgestellten Arbeitspakete vorgestellt werden.

AP1: Optimierung des LOHC-Hydrierverfahrens für Großanlagen

Die bereits bekannten Ruthenium-basierten Hydrierkatalysatorsysteme⁹ wurden typischerweise bei Temperaturen zwischen 150–220 °C betrieben. Durch eine weitere Erhöhung der Reaktionstemperatur konnte mit diesem Katalysatorsystem keine nennenswerte Produktivitätssteigerung erzielt werden. Durch den Partner Clariant wurde mit dem Produkt EleMaxH101 ein Katalysator evaluiert, welcher für die Hydrierung bei höheren Temperaturen geeignet ist. Dies ist vor allem durch den Wechsel der Aktivkomponente von Ruthenium hin zu Platin und Palladium zu begründen.

Damit der Katalysator vor einem Einsatz in einem Rieselbettreaktor im Technikumsmaßstab eingehend getestet werden kann, wurde bei Hydrogenious ein Hydrierautoklav im Labor aufgebaut. Das von Parr gelieferte System wurde mit der nötigen Peripherie und Gasversorgung ausgestattet, zudem wurde die Laboranlage ebenso für Dehydrierversuche vorbereitet. Die installierte Anlage ist in Abbildung 2 zu sehen.

Im gezeigten Hydrierautoklav wurde die Reaktionskinetik bei verschiedenen Drücken und Temperaturen ermittelt. Durch den Wechsel des Katalysators konnte die volumetrische Leistungsdichte bei vergleichbaren Reaktionsbedingungen um den Faktor 2 erhöht werden. Darüber hinaus zeigte der Platin/Palladium-Trägerkatalysator eine deutlich stärkere Temperaturabhängigkeit bei hohen Temperaturen. In Folge dessen wurde im Batchautoklaven ein Produktivitätssteigerungspotential von 85 % durch die Erhöhung der mittleren Reaktionstemperatur um 50 K ermittelt.

⁹ Müller, M. (2018). Entwicklung und Betrieb einer Anlage zur kontinuierlichen Hydrierung von flüssigen organischen Wasserstoffträgern im Technikumsmaßstab, Dissertation, Erlangen.



- 1 Reaktorbehälter
- 2 Reaktorkopf
- 3 Analoge Druckanzeige
- 4 Heizmantel
- 5 Controller
- 6 Gaswäscher
- 7 Gasprobennahmestrecke

Abbildung 2: Aufgebaute Laboranlage zur Hydrierung und Dehydrierung von LOHCs und Screening von Katalysatoren.

Dieses Potential sollte im Technikumsmaßstab in einem kontinuierlich betriebenen Rieselbettreaktor verifiziert werden. Zur Durchführung war ein neuer Reaktor mit höherer Designtemperatur nötig, welcher in die bereits bestehende Technikumsanlage integriert werden sollte. Deshalb wurde ein neuer Hochtemperatur-Hydrierreaktor mit zugehöriger Peripherie und Messtechnik ausgelegt, spezifiziert und angeschafft.

Im optimierten Anlagen-Setup konnte durch die Erhöhung der mittleren Reaktionstemperatur eine Steigerung der Produktivität um etwa 60 % festgestellt werden. Das ursprünglich identifizierte Potenzial wurde somit zu großen Teilen ausgeschöpft. Die Differenz hinsichtlich der beobachteten Aktivitätssteigerung in Batch- und Rieselbettreaktor sind auf die Unterschiede der Stoff- und Wärmetransportmechanismen innerhalb der Reaktorsysteme zurückzuführen. Durch die Katalysatorentwicklung und die Anpassung des Verfahrens konnte die Produktivität im Vergleich zum Stand der Technik vor Projektstart um insgesamt 220 % gesteigert werden. Zudem wurde das Abwärmepotential der exothermen Hydrierung erhöht, da diese nun auf einem um 50 K erhöhten Temperaturniveau vorliegt. Damit wurden entscheidende Schritte hin zur großtechnischen

Hydrierung von LOHCs gegangen. Die ursprünglich formulierten Ziele des Vorhabens (inkl. Deliverable 1.1.1) wurden erreicht.

AP3: Optimierung der Dehydrierung

Die Dehydrierung der LOHCs spielt für die ökonomische und ökologische Wirkung des LOHC-Kreislaufprozesses eine entscheidende Rolle. Durch die endotherme Reaktion ergibt sich eine, gegenüber der Hydrierung, erhöhte Reaktionstemperatur und ein Wärmeenergiebedarf mindestens in Höhe der Reaktionsenthalpie. Reaktor und Katalysator müssen dahingehend auf das System angepasst sein, um die Reaktion hinsichtlich Wärmeeintrag, Reaktionskinetik und Gesamtenergiebedarf effizient betreiben zu können.

Neben den am KIT entwickelten Reaktorsystemen, welche auf der Mikroverfahrenstechnik basieren, wurden von HLT mehrere Reaktorkonzepte hinsichtlich ihrer Eignung im industriellen Maßstab bewertet. Die Reaktoren wurden sowohl theoretisch als auch praktisch durch Experimente im Labormaßstab evaluiert. Ergebnis der Bewertung war, dass die neuen Konzepte gegenüber dem Stand der Technik in Form des waagrecht betriebenen Rohrbündelreaktors keine wesentlichen Vorteile mit sich bringen (Deliverable 3.2.1/ Meilenstein 2). Deshalb wurde das ursprüngliche Reaktordesign für die weitere Bearbeitung des Projekts beibehalten.

Auf der anderen Entwicklungsebene wurde vom Partner Clariant mit dem Katalysator EleMaxD101 ein auf das Stoffsystem angepasster Trägerkatalysator hervorgebracht. Der speziell dotierte Katalysator wurde hinsichtlich des Stofftransports und der Selektivität gegenüber den herkömmlichen Systemen verbessert. Eingehende Tests in einer bei HLT bestehenden Laboranlage mit Festbettreaktor bzw. der in Abbildung 2 dargestellten Batchanlage zeigten, dass der Katalysator gegenüber dem Stand der Technik eine um den Faktor 2 erhöhte Produktivität bezogen auf das Edelmetall besitzt (Deliverable 3.1.2). In den Versuchen zeigte sich zudem deutlich, dass die Selektivität der Dehydrierung erhöht wird und sowohl höhere LOHC-Stabilitäten sowie verbesserte Wasserstoffqualitäten erreicht werden.

Der freigesetzte Wasserstoff besitzt ohne weitere Aufreinigungsverfahren eine Reinheit von 99,95 %, dies entspricht einer Qualität 3.5. LOHC-Wasserstoff erfüllt damit die meisten Qualitätsanforderungen für den Einsatz in der chemischen Industrie. Die minimalen Verunreinigungen im Produktgas stammen zu einem Großteil aus den bereits im Wärmeträgeröl, welches als Ausgangsmaterial der LOHC-Anwendung dient, befindlichen leichtsiedenden Komponenten. Mittels einer Vorkonditionierung mit Stickstoff bei leicht erhöhter Temperatur lassen sich diese Verunreinigungen aus dem technischen Dibenzyltoluol entgasen. Als Folge dessen kann die H₂-Qualität auf 4.5 sprich 99,995 % Reinheit erhöht werden (Deliverable 3.1.1).

Ein ähnlicher Effekt wird erzielt, wenn das LOHC mehrere Zyklen des Kreislaufs aus Hydrierung und Dehydrierung durchlaufen hat. Die Menge an flüchtigen Kohlenwasserstoffen im Produktgas sinkt innerhalb der ersten 4 Zyklen um bereits 60 %.

Trotz der bereits sehr hohen Wasserstoffreinheit, bedarf es zum Einsatz des LOHC-Wasserstoffs in Brennstoffzellenfahrzeugen einer weiteren Reinigungsstufe. Die Wasserstoffqualität für Brennstoffzellenfahrzeuge ist durch die ISO-14687-2 streng reglementiert. Für einen Einsatz der LOHC-Technologie an einer Wasserstoff-Tankstelle ist diese Norm in jedem Falle einzuhalten.

Das Wasserstoff-Reinigungskonzept des Partners KIT beruht auf der Abtrennung von Verunreinigungen an einer Palladiummembran. Der vom KIT entwickelte Apparat kann der Dehydrierung direkt nachgeschaltet werden und somit in den bestehenden Prozess integriert werden. Eine erste Testeinheit wurde vom KIT geliefert und in eine bestehende LOHC-Dehydrieranlage im Labormaßstab eingebaut. Die Inbetriebnahme der Membrantrenneinheit verlief jedoch erfolglos, da die anfällige Palladiummembran einen Riss und in Folge dessen keine Trennwirkung aufwies. Das Deliverable 3.8.3 wurde somit nicht erreicht, wird jedoch im Rahmen der zweiten Förderphase nachgeholt.

AP4: Optimierung der Kombination Dehydrierer/ Kompressor/ Pufferspeicher

Die Anwendung der LOHC-Technologie zur Belieferung einer Wasserstofftankstelle, stellt ein konkretes Szenario dar, welches im Arbeitspaket 4 näher betrachtet werden sollte. Durch die weitestgehend definierten Schnittstellen zur Tankstelle (H_2 -Druckniveau, H_2 -Menge, Betankungsprofil, H_2 -Reinheit) konnte die Gesamtanlage bestehend aus Dehydrierer / Kompressor / Pufferspeicher und Reinigungskonzept rechnerisch optimiert werden. Durch Zulieferung entsprechender Validierungsdaten der Einzelkomponenten von FAU, ArevaH2Gen und HLT konnte durch das Fraunhofer ISE ein Gesamtmodell des LOHC-Dehydrierprozesses erstellt werden.

Die grundlegende Anlagenkonfiguration der H_2 -Freisetzungseinheit ist im Blockfließbild der Abbildung 3 dargestellt. Hydrogenious LOHC Technologies stellte dem Fraunhofer ISE insbesondere Validierungsdaten eines Dehydrierreaktors im Technikumsmaßstab zur Verfügung. In diesem kam der bereits in AP3 vorgestellte optimierte Dehydrierkatalysator von Clariant zum Einsatz (Deliverable 4.2.1). Diese beinhalteten sowohl Daten aus An- und Abfahrprozessen, als auch aus steady-state Betriebspunkten der Anlage. Dadurch konnte der Wärme- bzw. Strombedarf für die Dehydrierung detailliert abgebildet werden.

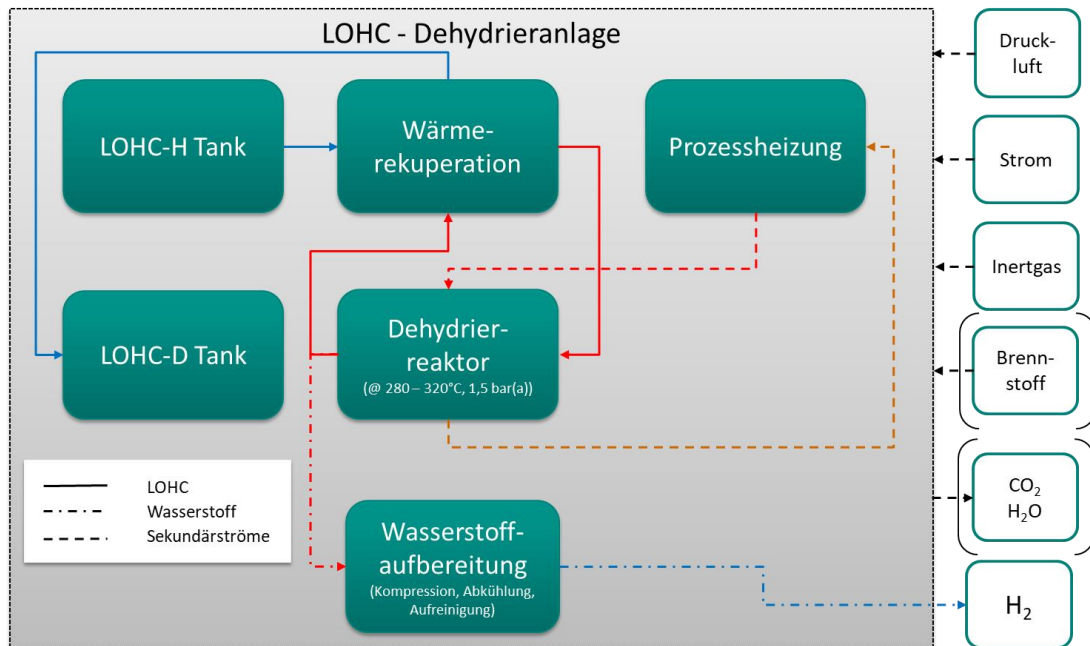


Abbildung 3: Anlagenkonfiguration einer Dehydrieranlage wie sie an H₂-Tankstellen zum Einsatz kommen kann.

Hinsichtlich der Wasserstoffreinigung ist, wie bereits erwähnt, die Norm ISO-14687-2 einzuhalten. In dieser Norm sind wie in Tabelle 2 ersichtlich eine Vielzahl von zu untersuchenden Komponenten festgehalten.

Tabelle 2: Auszug aus der ISO FDIS 14687-2. Zusammenfassung der maximal erlaubten Kontamination im Wasserstoff zur Nutzung als Treibstoff für Brennstoffzellenfahrzeuge.

Verunreinigung	chem. Formel	Maximale Konzentration
Wasser	H ₂ O	5 ppmV
Kohlenwasserstoffe	C _y H _x (CH ₄ -Basis)	2 ppmV
Sauerstoff	O ₂	5 ppmV
Helium	He	300 ppmV
Stickstoff / Argon	N ₂ / Ar	100 ppmV
Kohlendioxid	CO ₂	2 ppmV
Kohlenmonoxid	CO	0,004 ppmV
Schwefelhaltige Substanzen	H ₂ S, COS, CS ₂ und weitere	0,01 ppmV
Formaldehyd	HCHO	0,2 ppmV
Ameisensäure	HCOOH	0,1 ppmV
Ammoniak	NH ₃	0,05 ppmV
Halogenierte Substanzen	HCl, HBr, Cl ₂ und weitere	1 ppmW
Partikel	-	1 ppmW
Verunreinigungen Gesamt		300 ppmV
Geforderte H ₂ -Reinheit		99,97%
Reinheitsgrad		3.7

Zur genauen Quantifizierung dieser Stoffe bedarf es einer massiven Investition in unterschiedliche Messtechnik. Da aus dem LOHC-Dehydrierprozess jedoch nur ein kleiner Teil der aufgelisteten Verunreinigungen möglich sind, wurden die zu quantifizierenden Analyten reduziert (Deliverable

4.3.1). Dadurch lässt sich der zu betreibende finanzielle sowie organisatorische Aufwand für die Installation einer entsprechenden Analytik deutlich reduzieren. Mittels der etablierten FTIR-Messtechnik lässt sich eine entsprechende Wasserstoffqualitätsmessung mit moderaten Investitionen realisieren. Durch das angeschaffte FTIRs der Firma Bruker konnte der Wasserstoff nun hinsichtlich der in Abbildung 4 gekennzeichneten Verunreinigungen analysiert werden.

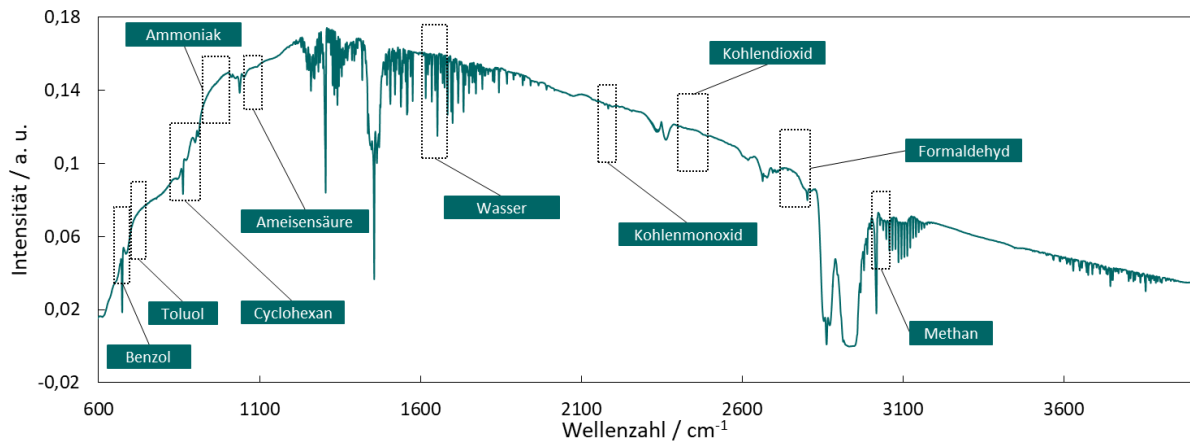


Abbildung 4: FTIR Spektrum des LOHC-Produkt-Wasserstoffs mit den markierten spezifischen Banden zur Detektion der Verunreinigungen.

Die Optimierung der LOHC-Dehydrieranlage und ihrer Einzelkomponenten war im Arbeitspaket 4 Bestandteil eines konzeptionellen Basic-Engineerings einer gesamten LOHC-Wasserstofftankstelle (LOHC-HRS) zur Betankung von Brennstoffzellen-PKW (700 bar). Im Rahmen dessen wurden mit den Partnern ArevaH2Gen, FAU und Fraunhofer ISE Betriebs- und Regelstrategien der Anlage definiert (Deliverable 4.5.2) damit die vorhandenen Spezifikationen des Wasserstofftankstellen-Betreibers H₂-Mobility eingehalten werden können. Im Zuge des Basic-Engineerings wurden zudem genehmigungsrechtliche und sicherheitstechnische Aspekte näher betrachtet. Die wesentlichsten Vorteile einer LOHC-HRS gegenüber einer Wasserstofftankstelle mit Druckgasspeicherung sind der verminderte Platzbedarf bei niedriger Anlieferfrequenz, sowie die deutlich größere Menge an bevorratbarem Wasserstoff an der Tankstelle. Darüber hinaus ist nach Einschätzung der Experten für eine LOHC-HRS kein Genehmigungsverfahren nach §4 BImSchG zu durchlaufen, welches für Tankstellen mit einer Druckgas-Bevorratung von >3 t notwendig werden würde. Eine Menge von 3 t H₂ entspricht dabei lediglich dem Wasserstoffbedarf einer Tankstelle der Größe L von 3 Tagen. Mit den vorliegenden Ergebnissen (Meilenstein 3) wurde gezeigt, dass die LOHC-Technologie für die H₂-Bereitstellung für Brennstoffzellenfahrzeuge gegenüber der aktuell eingesetzten Technik konkurrenzfähig ist. Im Zuge der zweiten Förderphase sollen die Ergebnisse als Grundlage für die Auslegung einer 350 bar H₂-Bustankstelle dienen.

AP5: Wasserstofflogistik in Verbindung mit der Industrie, Transferhydrierung

In diesem Arbeitspaket sollte die H₂-Belieferung des Clariant Standorts in Heufeld mittels LOHC evaluiert werden. Dazu wurden vom Partner Clariant Daten zum Wasserstoffbedarf aus dem Jahre 2015 bereitgestellt. Am Standort Heufeld lag der übers Jahr gemittelte Wasserstoffbedarf durchschnittlich bei 20 kg H₂ pro Tag, wobei die Abnahme des Wasserstoffs aus dem Gasnetz

unregelmäßig und diskontinuierlich ist. Durch die Kombination aus geringem und diskontinuierlichem Wasserstoffbedarf ergibt sich für den Standort Heufeld kein Business-Case.

In Förderphase II wird aus diesem Grund die Anwendung von LOHC-Wasserstoff in einem anderen Anwendungsszenario im industriellen Sektor geprüft. Es soll evaluiert werden inwiefern Wasserstoff aus dem LOHC-Prozess für die Befeuerung einer Glasschmelze genutzt werden kann. Für diesen Anwendungsfall wird kontinuierlich Wasserstoff für die Brenner benötigt, welche zudem ein hohes Wärmeintegrationspotential für die Dehydrierung aufweisen. Durch den Ersatz der herkömmlichen Methanbrenner könnte in diesem Fall ein erheblicher Beitrag zur CO₂-Reduktion geleistet werden.

2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Nachfolgend soll auf die wichtigsten Material und Investitionspositionen und deren Notwendigkeit zur Bearbeitung des Projekts eingegangen werden. Für die Experimente zur Bestimmung der Zyklfestigkeit des LOHCs sowie für Katalysatorscreenings in der Hydrierung und Dehydrierung im Labormaßstab wurde ein 2 l Autoklav der Firma Parr Instruments angeschafft. Damit die LOHC-Proben hinsichtlich des Hydriergrads charakterisiert werden können, wurde ein Benchtop-NMR der Firma Magritek und ein Dichtemessegerät nach dem Funktionsprinzip eines Biegeschwingers der Firma Mettler-Toledo angeschafft. Die Stabilität der LOHCs wurde nach den Zyklenversuchen mittels Gaschromatographie bestimmt, zu diesem Zweck wurde ein Gaschromatograph der Firma Bruker angeschafft. Für die Anwendung des freigesetzten Wasserstoffs in chemischen Prozessen oder in Brennstoffzellenfahrzeugen ist die Reinheit ein entscheidendes Kriterium. Zur Analyse der Wasserstoffreinheit wurden zwei Multi-Gas-Analysatoren der Firma Michell sowie ein FTIR der Firma Bruker angeschafft.

Die Hydrieranlage im Technikumsmaßstab wurde für den Betrieb im Hochtemperaturbereich vorbereitet. Die Anlage wurde dazu mit einem neuen Rohrbündelreaktor mit dazugehöriger Messtechnik ausgestattet.

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Das Kopernikus-Projekt „Power-to-X: Flexible Nutzung erneuerbarer Ressourcen“ hat sich zum Ziel gesetzt innerhalb von 10 Jahren ökologisch und ökonomisch sinnvolle Technologien der Sektorenkopplung zur industriellen Reife zu entwickeln. Viele dieser technologischen Ansätze sind noch jung und bedürfen einer intensiven Forschung bei gleichzeitiger technischer Entwicklung und Realisierung der Technologie.

Die Wasserstoffspeicherung mittels LOHCs stellt eine solch neuartige Technologie dar. Potentiale zur Verbesserung der Technologie bestehen in vielen Entwicklungsbereichen (Katalyse, Hydrier- und Dehydrierverfahren, Wasserstoffaufreinigung etc.). Um diese Potentiale auszuschöpfen müssen Forschung und technische Entwicklung Hand in Hand gehen und kontinuierlich abgeglichen werden. Dies bedarf einen massiven Arbeitseinsatz um frühzeitig Erkenntnisse aus der Forschung in die technische Realisierung einfließen zu lassen.

Hydrogenious LOHC Technologies als KMU stellt mit seiner breitgefächerten Kompetenz im Bereich der LOHC-Technologie und des Anlagenbaus und der flexibel agierenden Organisation die nötige Schnittstelle zwischen Grundlagenforschung und industrieller Reife des Gesamtprozesses dar. Die

geleistete Arbeit im Unternehmen reichte hierbei von angewandter Forschung über Technologieentwicklung bis zur Vorentwicklung.

Um diese Bandbreite der nötigen Arbeiten abzudecken wurde das Projekt von einer Vielzahl von Know-how-Trägern bearbeitet. Hauptsächlich waren diese im Bereich des *Researchs* und *Developments* tätig, zudem waren Kapazitäten aus den Bereichen *Engineering* (insbesondere Anlagenaufbau) und *Business Development* (Wirtschaftlichkeitsrechnungen) zur erfolgreichen Bearbeitung des Projekts nötig.

2.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Die erfolgreiche Nutzung von Erneuerbarer Energie im Bereich der Mobilität und Industrie ist ein wichtiger Faktor für eine erfolgreiche Energiewende in Deutschland und der Welt. Mit über 750 TWh Endenergieverbrauch trägt die Mobilität signifikant zu den CO₂-Emissionen bei und muss durch die Nutzung erneuerbarer Energieäquivalente zunehmend CO₂-frei gestaltet werden. Wasserstoff bietet hier eine sehr hochwertige Verwendung mit – im Vergleich zu anderen Power2X-Technologien - sehr attraktiver Wirtschaftlichkeit. In Deutschland gibt es aktuell starke Bestrebungen, die Infrastruktur für eine zukünftige Wasserstoffmobilität bereit zu stellen. Das Konsortium H2-Mobility (<http://h2-mobility.de/h2-stationen/>) hat angekündigt, bis 2023 in Deutschland 400 neue Wasserstofftankstellen zu errichten. Auch weltweit befindet sich die Wasserstofftankstelleninfrastruktur im Ausbau. Neben dem reinen Anlagenbau von LOHC-Systemen für Demonstration und initiale Marktdurchdringung arbeitet Hydrogenious LOHC Technologies am Aufbau strategischer Partnerschaften in den Zielmärkten um über Produkt- und IP-Lizensierung den Roll-out der LOHC Technologie zu beschleunigen. Zielkunden und -Partner sind dabei große Öl- und Gasfirmen (z.B. Shell, Chevron, Vopak, Linde, Air Liquide, etc.) aber auch Energieversorger (z.B. RWE, EON, etc.) sowie Technologieunternehmen (z.B. Mitsubishi, etc.).

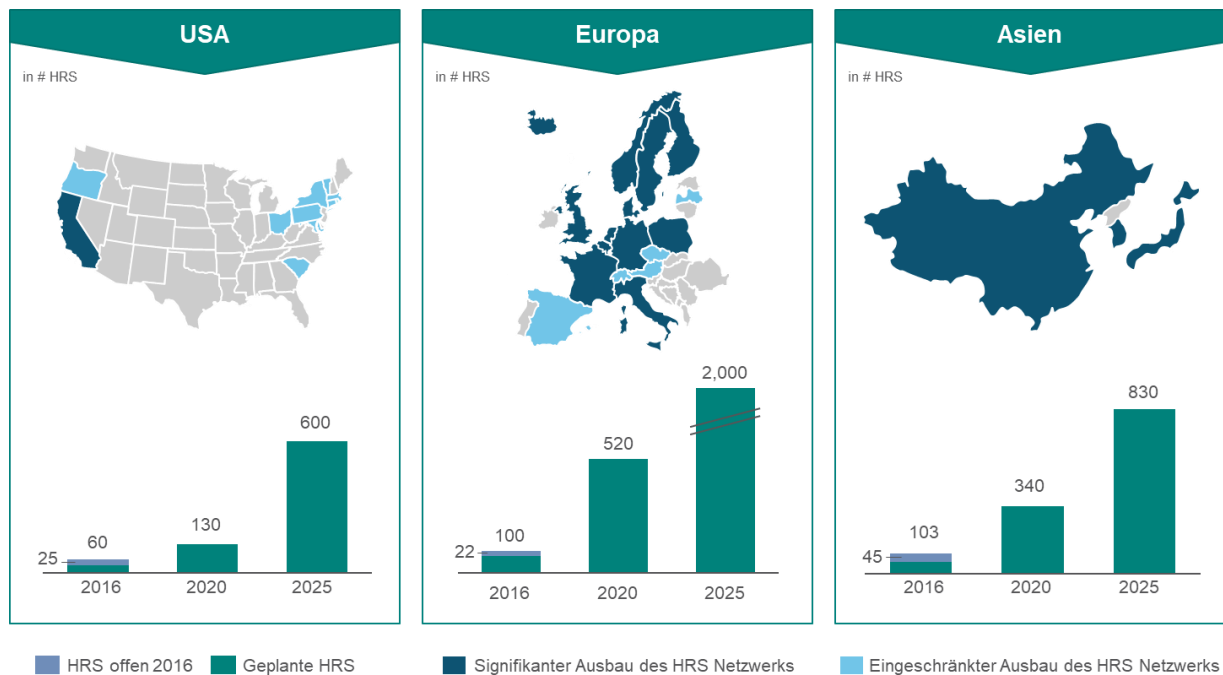


Abbildung 5: Pläne zum Ausbau der HRS Infrastruktur.

Die technische Aufgabe, Wasserstofftankstellen in den antizipierten Marktszenarien möglichst kostengünstig mit Wasserstoff zu versorgen, eröffnet ein breites Einsatzfeld für die Ergebnisse des Kopernikus Forschungsclusters und die Kommerzialisierung der LOHC-Technologie durch Hydrogenious Technologies. Gleiches gilt für die industrielle Verwendung von „grünem“ Wasserstoff: Da Elektrolysewasserstoff umso günstiger wird je größer der Elektrolyseur ist und je höher die Stetigkeit (Volllaststunden) seiner Produktion ist, ist es aus wirtschaftlicher Sicht besonders reizvoll, an zentralen Großelektrolyseuren mit hervorragenden regenerativen Bedingungen erzeugten Wasserstoff an die entsprechenden industriellen Verbrauchsstätten zu bringen. Auch hier bieten die erwarteten Projektergebnisse des Forschungsclusters neuartige technologische Pfade zur technischen Verwertung von „grünem Wasserstoff“ mit sehr attraktiver Wirtschaftlichkeit. Insbesondere die Glasherstellung wurde als lukrative Endanwendung identifiziert und soll in der zweiten Förderphase näher betrachtet werden.

Im Forschungscluster wird die in ihrer grundlegenden Funktionalität bereits nachgewiesene LOHC-Technologie für die speziellen Anforderungen der oben genannten, besonders anspruchsvollen Anwendungsszenarien weiterentwickelt. Aus der ersten Förderphase hat sich insbesondere die Versorgung großer Wasserstofftankstellen (z.B. für Busse oder Züge in Versorgungshöfen) auf Basis der 350 bar Technologie als sinnvolles Zielmarktsegment herausgestellt. Ziel der zweiten Förderphase ist es, 350 bar Tankstellen auf Basis der LOHC-Technologie mit stark reduzierten Investitionskosten und operativen Kosten zu entwickeln. Darüber hinaus soll die Belieferung eines industriellen Standortes mit Wasserstoff und die effiziente industrielle Nutzung in der Glasindustrie untersucht und weiterentwickelt werden.

Die wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit ergibt sich durch die geplante weitere Vorgehensweise im Rahmen des auf 10 Jahren angelegten Kopernikus-Projekts. Während in der ersten

Förderphase wesentliche verfahrenstechnische Grundlagen entwickelt und Anwendungsszenarien konkretisiert wurden, erfolgt in der zweiten Förderphase nun die Auslegung der LOHC Anlagen auf zwei konkrete Anwendungsfälle. Die dritte Förderphase soll dann die die Erweiterung der Einsatzszenarien und technologischen Lösungsansätze sowie Fragestellungen zur Serienproduktion und breiten technischen Umsetzung ins Zentrum rücken.

Für die beiden entwickelten Anwendungsszenarien des Forschungsclusters ergibt sich das Geschäftsmodell aus der Tatsache, dass über LOHC-Technologie gelagerter oder antransportierter Wasserstoff im Vergleich zu bisherigen Transport- oder Bereitstellungsoptionen insgesamt wirtschaftlicher und nachhaltiger ist. Dies soll entsprechende Anlagenbetreiber dazu bewegen, beim Aufbau neuer Infrastrukturen (Ausbau Wasserstofftankstellen) oder bei der Wahl von Belieferungsoptionen (Lieferung von Wasserstoff an industrielle Standorte) bevorzugt auf die im Forschungscluster entwickelten Technologien zu setzen. Dadurch ergeben sich für die beteiligten Industriepartner Geschäftsmöglichkeiten durch Produktion, Lizenzvergabe oder Selbstnutzung. Für die akademischen Partner und Forschungsinstitute ergeben sich neue Tätigkeitsfelder in Forschung und Entwicklung mit hoher Zukunftsrelevanz und Nachfrage.

Im hier beantragten F/E-Verbundprojekt ist mittelfristig mit der Entwicklung von marktnahen und direkt vermarktungsfähigen Produkten zu rechnen. Speziell auf dem Gebiet der Komplettlösungen für Sektorenkopplung, LOHC Logistik und Belieferung von Wasserstofftankstellen, werden diese Produkte das Portfolio der Hydrogenious LOHC Technologies sinnvoll erweitern. Für die anvisierten Produktgrößen für LOHC-Dehydrieranlagen ergibt sich damit der in

Tabelle 3 dargestellte Verwertungsplan.

Tabelle 3: Verwertungsplan für LOHC-Dehydrieranlagen

Anzahl verkaufter HRS LOHC Einheiten	Feldtests (Prototypen im Bestand)			Kommerzielle Phase (Neusysteme pro Jahr)		
	2025	2027	2029	2030	2035	2040
ReleasePLANT 700 (300 – 700 Nm ³ /h)	1	4	14	20	38	74
ReleasePLANT 1000 (500 – 1000 Nm ³ /h)	0	1	2	9	18	40
ReleasePLANT 2000 (1000 – 2000 Nm ³ /h)	0	0	1	2	6	15

Die im Projekt erzielten Forschungsergebnisse werden als Grundlage für weiterführende Entwicklungen und Kooperationen genutzt. Die erzielten Forschungsergebnisse sollen zudem im Laufe des Kopernikus Projekts in Form von Artikeln in wissenschaftlichen Fachzeitschriften und als Konferenzbeiträge dem Fachpublikum öffentlich zugänglich gemacht werden.

2.5 Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Die LOHC-Technologie wird weltweit als eine potentielle Wasserstofftransport- und Speichermöglichkeit angesehen und wurde unlängst als Option im Rahmen des zweiten *Hydrogen Energy Ministerial Meetings* des G20-Gipfels in Tokio 2019 erwähnt. Die Aktivitäten auf diesem Gebiet nehmen in den letzten Jahren stark zu. Durch die aktuelle Schutzrechtslage in Bezug auf das Stoffsystem Dibenzyltoluol/Perhydro-Dibenzyltoluol beschränkt sich der Fortschritt anderer Stellen auf dem Gebiet des Vorhabens zumeist auf die Konsortialpartner und auf Forschungseinrichtungen. Hervorzuheben sind insbesondere die Veröffentlichungen des Konsortialpartners FAU in Bezug auf die Katalysatorentwicklung für die Dehydrierung¹⁰, der Mischgashydrierung¹¹, der LOHC-Stabilität in Zyklenversuchen¹² und der Wasserstoffreinheit nach der Dehydrierung¹³.

Darüber hinaus seien die Veröffentlichungen des Partners KIT^{14,15} hinsichtlich neuer Reaktor- und Wasserstoffreinigungsverfahren in der Dehydrierung, sowie jene des Partners RWTH¹⁶ hinsichtlich der Katalysatorentwicklung für die Dehydrierung zu nennen. Die Fortschritte sind zum Teil Bestandteil des Verbundprojekts „P2X“ gewesen.

Relevante veröffentlichte Fortschritte außerhalb der Partner des Verbundprojekts sind zum jetzigen Zeitpunkt nicht bekanntgeworden.

¹⁰ Auer, F., Blaumeiser, D., Bauer, T., Bösmann, A., Szesni, N., Libuda, J., & Wasserscheid, P. (2019). Boosting the activity of hydrogen release from liquid organic hydrogen carrier systems by sulfur-additives to Pt on alumina catalysts. *Catalysis Science & Technology*, 9(13), 3537-3547.

¹¹ Jorschick, H., Bösmann, A., Preuster, P., & Wasserscheid, P. (2018). Charging a Liquid Organic Hydrogen Carrier System with H₂/CO₂ Gas Mixtures. *ChemCatChem*, 10(19), 4329-4337.

¹² Jorschick, H., Preuster, P., Dürr, S., Seidel, A., Müller, K., Bösmann, A., & Wasserscheid, P. (2017). Hydrogen storage using a hot pressure swing reactor. *Energy & Environmental Science*, 10(7), 1652-1659.

¹³ Bulgarin, A., Jorschick, H., Preuster, P., Bösmann, A., & Wasserscheid, P. (2020). Purity of hydrogen released from the Liquid Organic Hydrogen Carrier compound perhydro dibenzyltoluene by catalytic dehydrogenation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(1), 712-720.

¹⁴ Wunsch, A., Mohr, M., & Pfeifer, P. (2018). Intensified LOHC-Dehydrogenation Using Multi-Stage Microstructures and Pd-Based Membranes. *Membranes*, 8(4), 112.

¹⁵ Wunsch, A., Kant, P., Mohr, M., Haas-Santo, K., Pfeifer, P., & Dittmeyer, R. (2018). Recent Developments in Compact Membrane Reactors with Hydrogen Separation. *Membranes*, 8(4), 107.

¹⁶ Palkovits, R., Artz, J., & Chen, X. (2018). A study on the dehydrogenation of loaded liquid organic hydrogen carriers (LOHC) with heterogeneous catalysts. *Chemie Ingenieur Technik*, 90(9), 1171-1171.