



Fraunhofer

FRAUNHOFER WASSERSTOFF- EXZELLENZ

Innovationen im Fokus

Inhalt

Vorwort: Wasserstoff – zentrales Element der globalen Energiesystemtransformation.	4
Wasserstoff-Leitprojekt H2Mare	6
Wasserstofferzeugung durch Elektrolyse und weitere Verfahren	8
Essenzielle Bausteine für die chemische Industrie und Mobilität – Methanol, Ammoniak, synthetische Kraftstoffe und Wasserstoff-trägermaterialien	14
Wasserstoff-Infrastrukturen	18
Nutzung von Wasserstofftechnologien in der Industrie, Strom- bzw. Wärmeerzeugung und Mobilität	22
Erprobung von Elektrolyseuren im Industriemaßstab	26
Sicherheit, Lebensdauer und Zuverlässigkeit für die Wasserstoffwirtschaft.	29
Die digitale Welt des Wasserstoffs.	32
Produktion von Wasserstoff-Systemen: Elektrolyseur und Brennstoffzelle	36
Vom Material zum System: Werkstoffe als Innovationstreiber	40
Kompetenzaufbau für den Wandel zum Energieträger Wasserstoff – Werden auch Sie Wasserstoff-Pionier*in mit Fraunhofer Know-how!	46
Fraunhofer-Wasserstoff-Netzwerk.	50

Impressum

Konzeption und Redaktion

Kristin Kschammer,
 Fraunhofer Einrichtung für Energieinfrastrukturen
 und Geothermie

Text

Fraunhofer Wasserstoff-Netzwerk

Satz & Layout

con|energy agentur gmbh, Essen
www.conenergy-agentur.de

Copyright

Bei Abdruck ist die Einwilligung der Redaktion erforderlich.
 © Fraunhofer-Gesellschaft e.V., München 2023

Wasserstoff – zentrales Element der globalen Energiesystemtransformation

Sehr geehrte Wasserstoffinteressierte,

bis Mitte des Jahrhunderts will die Weltgemeinschaft klimaneutral sein und ihren CO₂-Ausstoß stoppen. Diese Verpflichtung der internationalen Staatengemeinschaft rückt den Energieträger Wasserstoff in den Fokus. Denn erneuerbare Energien sowie nachhaltig hergestellter Wasserstoff und seine Derivate können fossile Energieträger und Ressourcen ersetzen. Die enorme Bandbreite der Anwendungsmöglichkeiten von Wasserstoff faszinierte schon in der Vergangenheit, aber erst jetzt entfaltet sich das gewaltige Potenzial von Wasserstoff als Energieträger und -speicher sowie als Basischemikalie.

Der Erfolg der Defossilisierung globaler Energiesysteme benötigt eine Systemarchitektur, die die direkte, lokale Elektrifizierung durch erneuerbare Energien mit einem global vernetzten Handelssystem für zertifizierte, molekülbasierte Energieträger auf Basis von Wasserstoff kombiniert. Eine Wasserstoffwirtschaft bietet vielfältige Hebel für die Wende hin zu einem klimaneutralen, nachhaltigen und leistungsfähigen Wirtschaftssystem.

Vielfältige Weichenstellungen Richtung Wasserstoffwirtschaft

Die Nationale Wasserstoffstrategie der Bundesregierung hat die Weichen bereits 2020 gestellt, um eine nachhaltige und ökonomische Wasserstoffwirtschaft zu fördern. Durch ihre Fortschreibung im Jahr 2023 hat sie die Zielbilder geschärft. Sie beschreibt, wie Deutschland durch die Nutzung von grünem Wasserstoff in Industrie, Verkehr und Energiesystemen die Klimaschutzziele bei gleichzeitiger Wettbewerbsfähigkeit erreichen und dabei neue Märkte erschließen kann.

Die Ziele umschließen einen beschleunigten Markthochlauf von Wasserstoff mit dem Schwerpunkt des Aufbaus einer leistungsfähigen Wasserstoffinfrastruktur und damit der Sicherstellung ausreichender Verfügbarkeit von Wasserstoff und seinen Derivaten in den verschiedenen Endabnehmermärkten. Hiermit kann Deutschland Leitanbieter für Wasserstofftechnologien werden, da es über hochspezialisierte und erfahrene Unternehmen entlang der gesamten Wertschöpfungskette verfügt – von der Materialveredelung über die Produktion von Systemen und Komponenten bis hin zu den unterschiedlichen systemischen Anwendungen.

Künftige Herausforderungen für die Wasserstoffwirtschaft

Neben den politischen Rahmenbedingungen sind für die Hochskalierung der Wasserstoffwirtschaft jedoch erhebliche technologische und organisatorische Innovationen und Anstrengungen nötig, da sich die Technologie- und Marktentwicklung in zentralen Elementen der Wertschöpfungskette aktuell noch in einer frühen industriellen Phase befindet. Deshalb sind Forschungs- und Entwicklungsbeiträge – von grundlegenden Materialfragestellungen bis hin zu innovativen, skalierungsfähigen Produktionsverfahren – essenziell für die Herstellung und Sicherung einer deutschen und europäischen Technologieführerschaft, die Chancen für die deutsche Industrie auf allen Stufen der Wertschöpfungskette eröffnet.

Weitere intensive Forschungen sind beispielsweise nötig für die Digitalisierung in den Wasserstofftechnologien, die Skalierung der Produktion von Brennstoffzellen- und Elektrolysesystemen, eine klimaneutrale Chemieindustrie, eine ressourcenschonende Kreislaufwirtschaft, neuartige Elektrolyseverfahren, hocheffiziente Power-to-X-Prozesse sowie skalierungsfähige und kostengünstige Direct Air Capture (DAC)-Technologien. Hierzu möchte die Fraunhofer-Gesellschaft weiterhin einen entscheidenden Beitrag leisten. Mit Anwendungsnähe und wissenschaftlicher Exzellenz kann sie als Innovationstreiber wirken und den Transfer von Wasserstofftechnologien in die Industrie über alle Themenfelder hinweg begleiten.



Prof. Mario Ragwitz



Prof. Christopher Hebling

Kompetenz für den Markt

Die Fraunhofer-Gesellschaft ist Europas größte Organisation für anwendungsorientierte Forschung. Sie hat sich verpflichtet, die großen gesellschaftlichen Herausforderungen anzunehmen. So hat sie sich früh den technischen und systemischen Fragen gestellt, die für einen nachhaltigen Umbau der Energiesysteme zu beantworten sind, und dabei ihre Kompetenzen und Kapazitäten permanent erweitert: Beispielsweise durch das Exzellenzcluster »Integrierte Energiesysteme« CINES, welches die Kompetenzen der Institute bündelt. Durch Gesamtsystemoptimierungen adressiert es die zentralen technologischen und ökonomischen Herausforderungen der Energiewende mit ihren hohen Anteilen volatiler Erneuerbarer Energieerzeugung. Das Wasserstoff-Netzwerk der Fraunhofer-Gesellschaft koordiniert die Arbeit von aktuell 36 Instituten in diesem Themenfeld.

Die Fraunhofer-Gesellschaft verfügt in den Wasserstofftechnologien über mehr als dreißig Jahre Erfahrung und eine bewährte Forschungsinfrastruktur; sie beschäftigt exzellente Forscherinnen und Forscher, die die Herausforderungen des globalen Energiesystems vorausdenken, Lösungen entwickeln und somit die nötige Kompetenz für diesen gesellschaftlichen Wandel bereitstellen.

Wir laden Sie ein, sich in den folgenden Kapiteln über unsere Kompetenzen und Leistungsangebote zu den Wasserstofftechnologien zu informieren. Wir stellen zentrale Schwerpunkte der Fraunhofer-Wasserstoff-Forschung vor und adressieren industrielle Bedarfe. Weiterführende Informationen finden Sie in den Internetangeboten des Fraunhofer-Netzwerks und der einzelnen Institute.

Wir freuen uns auf die Zukunft und auf eine Zusammenarbeit mit Ihnen, die diese nachhaltig gestaltet.

Prof. Mario Ragwitz
Sprecher des Fraunhofer Wasserstoff-Netzwerks

Prof. Christopher Hebling
Sprecher des Fraunhofer Wasserstoff-Netzwerks



Zurück vom Service-
einsatz auf der
Offshore-Anlage

Wasserstoff-Leitprojekt H₂Mare

Auf See herrschen beste Bedingungen zur Erzeugung erneuerbaren Stroms. Die Herstellung von grünem Wasserstoff in Offshore-Anlagen aus Windenergie ohne Netzanbindung kann die Kosten gegenüber der Erzeugung auf Land deutlich senken. Die direkte Kopplung von Windenergieanlage und Elektrolyseur in einem neuartigen Anlagentyp macht es möglich, ohne Anbindung ans Stromnetz auszukommen. Das BMBF-geförderte Leitprojekt H₂Mare erforscht die Erzeugung von grünem Wasserstoff und anderen Power-to-X-Produkten Offshore für die geplante großskalige Produktion von Offshore-Wasserstoff. Das Fraunhofer IWES wird neben weiteren Projektpartnern auch durch die Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IWU, IMWS, IGB und ICT unterstützt.

H₂Mare leistet einen zentralen Beitrag zur Umsetzung der Nationalen Wasserstoffstrategie und Energiewende. Durch die Kopplung von innovativen Windenergieanlagen und Elektrolyseuren können grüner Wasserstoff und andere Power-to-X-Produkte künftig kostengünstig direkt auf hoher See erzeugt werden. Fraunhofer unterstützt die Industrie bei der Entwicklung der dafür benötigten Technologien.«



Dr. Nadine Menzel
Gruppenleiterin elektrochemische Analytik
Fraunhofer IWES, Projektleitung H₂-Wind

Untersuchung, Analyse und Modellierung von Stack-Komponenten und deren Degradationsverhalten

Im Bereich der Analyse von Stack-Komponenten werden vom Fraunhofer IWES chemische, elektrochemische und mechanische Versuchsreihen zu spezifischen Materialeigenschaften, zur Performance und zu deren Degradationsverhalten unter simulierten Offshore-Bedingungen an Laborzellen und -stacks (25 cm²) sowie mit dem im Projekt gemeinsam mit dem Fraunhofer IWU entwickelten Forschungsstack durchgeführt. Die Änderungen der Materialeigenschaften werden mikrostrukturell bewertet, mit den makroskopischen Messgrößen sowie Betriebs- und Umgebungsbedingungen korreliert, um kausale Zusammenhänge mit Hilfe von Modellen aufzuzeigen und daraus Handlungsempfehlungen zur Membran- und Materialoptimierung abzuleiten. Letztlich soll eine geeignete Testinfrastruktur aufgebaut werden.

100 m³ Meerwasserbecken als Prüfstand zur Wasseraufbereitung

Innerhalb des Projektes baut das Fraunhofer IWES außerdem einen Prüfstand zur Testung von Meerwasserentsalzungsanlagen bei direkter Kopplung an einen PEM-Elektrolyseur. Die Idee ist es, die bei der Elektrolyse entstehende Abwärme zu nutzen, um die benötigte Prozesswärme für eine Entsalzungsanlage bereit zu stellen. Hierdurch könnte sich der Gesamtwirkungsgrad der Wasserstoffherzeugung deutlich erhöhen. Die Abstimmung der Komponenten, sowie die Untersuchung des Anlagenverhaltens bei einer hoch dynamischen elektrischen Leistung durch eine Windenergieanlage ist derzeit Gegenstand der Forschung. Der elektrische Anschluss des PEM-Elektrolyseurs ist zunächst für einfache

elektrische Tests vorgesehen, jedoch soll noch innerhalb der Projektlaufzeit die Möglichkeit bestehen, reale Windenergieanlagen an das Testfeld zu koppeln, oder auch dynamische elektrische Tests mittels einer Hardware in the Loop (HIL) Simulation durchzuführen.

Techno-ökonomische Simulationen zur optimalen Anlagendimensionierung

Die Co-Simulation im Projekt H₂Mare ist ein zentrales Werkzeug für die Entwicklung von modularen Energiesystemen. Die Austauschbarkeit von Modellen durch ein einheitliches Verschaltungskonzept bietet kürzere Entwicklungszeiten und erhöht die Wiederverwendbarkeit von Simulationsmodellen. Am Fraunhofer IWES werden Modelle für die Abbildung der gesamten Wertschöpfungskette aufgestellt, welche durch Functional Mockup Units (FMU) in Co-Simulation miteinander verbunden werden. Dazu wurde eine Simulationsplattform mit integriertem Verschaltungskonzept für Modelle und Optimierung mit Co-Simulation entwickelt. Co-Simulation nimmt eine zentrale Rolle im Projekt ein. Dadurch wird es ermöglicht Modelle wiederzuverwenden und in einem neuen Kontext miteinander zu verbinden, ohne dass ein großer Mehraufwand entsteht. Insgesamt bilden Betrieb und Wartung, die Wake-Berechnung (Foxes), Betriebsführung und WEA-ELY System die zentralen Bestandteile der Untersuchung.

Das Leitprojekt H₂Mare mit seinen Unterprojekten startete im April 2021 und endet 2025. Das avisierte Ziel sind wesentliche Erkenntnisse und Demonstratoren für die direkt-gekoppelte Wasserstoffelektrolyse als Vorbereitung für einen Demonstrator im MW-Bereich und erste Projekte in der Nordsee in der zweiten Hälfte dieser Dekade.



Druckelektrolyse-Block für die Wasserstoffherzeugung

Wasserstoffherzeugung durch Elektrolyse und weitere Verfahren

Viele Wege führen zum Wasserstoff! Nach dem Ausbau der erneuerbaren Energien und dem Einsatz von elektrischen Energiespeichern stellt die Erzeugung von nachhaltigem Wasserstoff als Ausgangsstoff für synthetische Energieträger den dritten zentralen Baustein der Energiewende dar.

Bei der Elektrolyse wird Wasser mithilfe von elektrischem Strom in die Gase Wasserstoff (H₂) und Sauerstoff (O₂) zerlegt. Wird der verwendete Strom aus erneuerbaren Quellen gewonnen, spricht man von **grünem Wasserstoff**. Jede Art der Elektrolyse bietet spezifische Vorteile, weshalb die Wahl der geeigneten Technologie je nach Einsatzszenario variiert.

Während die alkalische Elektrolyse und die Proton-Exchange-Membrane (PEM)-Elektrolyse bereits technisch ausgereift sind, bestehen bei der alkalischen Membran-Elektrolyse und der Hochtemperatur-Elektrolyse noch offene technologische Fragen.

Über viele Jahrzehnte haben sich robuste **alkalische Elektrolyseure** als zuverlässige Technologie in Kraftwerken und Chemieanlagen im stationären Betrieb mit konstanter Last bewährt. Nun steht jedoch ein Paradigmenwechsel bevor: Die verstärkten Lastschwankungen aufgrund der regenerativen Energien erfordern zusätzliche Konzepte.

Jünger als die alkalische Elektrolyse ist die **PEM-Elektrolyse** und weist diverse Vorteile auf: Mit ihr kann die verwendete Stromdichte sehr hoch und die Bauweise sehr kompakt sein. Das Verfahren ist dynamisch und die Zelle kann bei hohem

Druck betrieben werden. Aufgrund des sauren Mediums erfordert die PEM-Elektrolyse jedoch sehr robuste Materialien, was unter anderem den Einsatz von Edelmetallen für die Elektroden erfordert. Die PEM-Elektrolyse befindet sich derzeit in der Phase des Scale-Ups und der Kostendegression und damit auf dem Weg zur Massenproduktion.

Kompaktere Elektrolyseure und kostengünstige Katalysatormaterialien lassen sich über **alkalische Membran-Elektrolysezellen** realisieren. Die Grundprozesse sind im Wesentlichen geklärt, aktuell stehen Fragen der Anwendung im Vordergrund.

Die Hochtemperatur-Elektrolyse erfolgt bei Temperaturen über 700 °C und entfaltet ihre Stärken dort, wo Abwärme zur Verfügung steht: Um ihre Reaktionen zu katalysieren, sind keine Edelmetalle nötig und es lassen sich gleichzeitig sehr hohe elektrische Wirkungsgrade erzielen. Diese Systeme können sowohl im Elektrolyse- als auch im Brennstoffzellenmodus genutzt werden. Darüber hinaus ermöglicht sie die Co-Elektrolyse, bei der Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff sowie Kohlendioxid in Sauerstoff und Kohlenmonoxid aufgespalten werden. Das Kohlenmonoxid bildet zusammen mit Wasserstoff das »Synthesegas«, welches als Ausgangsstoff für die Herstellung zahlreicher chemischer Produkte dient. Eine vergleichbare **Co-Elektrolyse** ist auch bei geringeren Temperaturen (< 100 °C) mit z.B. PEM-basierten Elektrolyseuren möglich. Hierbei können neben der Produktion von Synthesegas (Wasserstoff / Kohlenmonoxid) aus Kohlendioxid und Wasser auch die Synthese weiterer chemischer Grundstoffe wie Ameisensäure, Ethylen oder Ethanol ermöglicht werden. Solche Verfahren tragen so maßgeblich zur **Defossilisierung chemischer Produkte** und zur Synthese nachhaltiger Kraftstoffe für z.B. die Luft- oder Schifffahrt bei, indem sie einen geschlossenen Kohlenstoffkreislauf ermöglichen. Dieses Konzept wird als **Carbon Capture and Utilization (CCU)** Technologie bezeichnet.

Derzeit wird der größte Anteil an sogenanntem grauem Wasserstoff durch die **Dampfreformierung** von Erdgas erzeugt, was jedoch mit erheblichen Mengen an freigesetztem Kohlendioxid einhergeht. Eine nachhaltige Alternative besteht darin, das Erdgas durch **Biogas (aus Biomassevergasung)** zu ersetzen. Werden dafür biogene Reststoffe verwendet, ist dieser Prozess nachhaltig. Zusätzlich zu Erdgas kann auch Kohle als fossiler Rohstoff eingesetzt werden. In einer **hydrothermalen Vergasung** mit Wasserdampf wird Wasserstoff erzeugt, der auch als **schwarzer Wasserstoff** bezeichnet wird.

Von **blauem Wasserstoff** ist die Rede, wenn das bei der Dampfreformierung freigesetzte Kohlendioxid abgetrennt und in Lagerstätten im geologischen Untergrund gespeichert wird. Dieser Prozess wird als **Carbon Capture and Storage (CCS)** bezeichnet. Obwohl das Kohlendioxid so nicht in die

Atmosphäre gelangt, besteht die Herausforderung darin, es dauerhaft und sicher zu lagern. **Türkiser Wasserstoff** entsteht bei der sogenannten **Methanpyrolyse** aus Erdgas, wobei Methan durch die Zufuhr von thermischer oder elektrischer Energie in gasförmigen Wasserstoff und festen Kohlenstoff gespalten wird. Dieser Feststoff kann einfach gelagert werden und dient als Ausgangsstoff für vielseitige Anwendungen. Blauer und türkiser Wasserstoff werden derzeit als Brückentechnologie diskutiert, bis Kostensenkungen bei der Elektrolyseurherstellung und ein weltweit wachsendes Angebot von kostengünstigem Strom aus Wind- und Sonnenenergie dafür sorgen, dass grüner Wasserstoff in ausreichenden Mengen zur Verfügung steht.

Ein weiteres Verfahren nutzt Sonnenlicht zur direkten Erzeugung von **grünem Wasserstoff**, indem Halbleiter das Licht absorbieren und an ihrer Oberfläche katalytisch Wasser spalten. Dieses Verfahren wird in photoelektrochemischen Zellen (PEC) umgesetzt, in denen Ladungsträger erzeugt werden, die dann für die Reduktion zu Wasserstoff bzw. die Oxidation zu Sauerstoff sorgen. Perspektivisch verspricht die direkte **PEC-Spaltung** von Wasser durch Licht einfache Aufbauten mit geringer Systemkomplexität. Praktisch befindet sich die Technologie aber noch in einem frühen technologischen Reifestadium.

Der Einsatz von photosynthetischen oder (photo-)fermentativen Mikroorganismen stellt eine rein biologische Methode zur Wasserstoffherstellung dar. Einige Vertreter von Mikroorganismen (z. B. Bakterien) und auch einige wenige eukaryotische Einzeller (z. B. Grünalgen) bilden Wasserstoff als Stoffwechselprodukt. Allerdings befinden sich photokatalytische und biologische Verfahren noch im frühen Entwicklungsstadium und können noch nicht abschließend auf ihre potenzielle Marktfähigkeit bewertet werden.

SkalPro – Skalierbare Produktionsprozesse für hocheffiziente Elektroden in der alkalischen Elektrolyse

Um in naher Zukunft hochaktive Elektroden für die alkalische Wasserelektrolyse in hoher Stückzahl produzieren zu können, sind weitere Innovationsschritte erforderlich. Das Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM hat sich daher zum Ziel gesetzt, ein Verfahren zur Herstellung von Elektroden zu entwickeln und zu erproben. Dieses Verfahren soll es ermöglichen, hochaktive Elektroden zu in großen Mengen und zu geringen Kosten herzustellen. Derzeit sind skalierbare Produktionsverfahren dieser Art nur in begrenztem Umfang auf dem Markt verfügbar. Das übergeordnete Ziel des Projektes ist die Entwicklung einer effizienten, kostengünstigen und ressourcenschonenden Produktionskette im Technikums-Maßstab zur Herstellung von hocheffizienten und langzeitstabilen Elektroden, die den Anforderungen der Elektrolyseindustrie entsprechen.

Integrate – Innovative Designs für alkalische Membran-Elektroden zur kostengünstigen Herstellung von grünem Wasserstoff im Gigawatt-Maßstab

Die vollständige Umstellung des Energiesektors von einer Wirtschaft basierend auf fossilen Energieträgern zu einer, die erneuerbare Energien zu ihrer Grundlage macht: Das ist ehrgeizige Ziel der Industrieländer bis 2050. Allein für Deutschland ergibt sich daraus ein Wasserstoff-Bedarf von 78 Terawattstunden (TWh) für 2030 und 294 TWh für 2050. Die erforderliche Elektrolysekapazität hängt stark von der Effizienz der Technologie ab, wird aber in der Größenordnung von 44 Gigawatt (GW) Kapazität für 2030 und 213 GW Kapazität für 2050 liegen. Dieses Modell basiert jedoch auf einer Steigerung des Wirkungsgrads der Elektrolysetechnik um 12 % zwischen 2030 und 2050. Um dies zu erreichen, müssen bestehende Elektrolysetechnologien (alkalische Elektrolyse - AEL, Polymer-elektrolytmembran-Elektrolyse - PEMEL, Festoxid-Elektrolysezelle - SOEC) weiterentwickelt werden und neue, effizientere Technologien den Weg zur Marktreife finden.

Ein Projekt des Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM sieht in der Anionenaustauschmembran-Elektrolyse (AEMEL) die aussichtsreichste Technologie zur Verbesserung des Wirkungsgrades mit Zellspannungen von 1,8 V bei einer Stromdichte von 1,5 A/cm² bis 2030. Die Hauptvorteile dieser Technologie bestehen darin, dass der ohmsche Innenwiderstand durch

den Einsatz einer Anionenaustauschmembran (AEM), der dem PEMEL entspricht, radikal reduziert werden kann. Im Gegensatz zum PEMEL erlaubt das alkalische Medium jedoch die Verwendung von Übergangsmetallen in allen Komponenten. Damit ist eine geringe Kritikalität für alle Materialien und die Skalierung der Technologie im Gegensatz zum PEMEL gegeben. Das Projekt umfasst den Entwurf und die Optimierung eines neuartigen Anionenaustauschmembran-Elektrolyseurs (AEMEL), der für den GW-Markt konzipiert wurde, um die Kosten für die Wasserstoffproduktion zu minimieren. Neu sind dann die Elektrodenzusammensetzung, die chemische Struktur der Membran, die durch Modellierung optimierte Katalysatorschicht-Struktur, das Verwenden neuer poröser Transportschichten und die Implementierung der Ergebnisse in einen AEMEL Stack.

Offsh2ore – Wasserstoffherzeugung auf dem Meer durch PEM-Elektrolyse

Im Projekt Offsh2ore wurde ein technisches Anlagenkonzept für eine Offshore-Wasserstoffproduktion in Verbindung mit einem schiffsbasierten Transportkonzept für Druckwasserstoff erarbeitet. Das Team, bestehend aus Projektpartnern¹ entlang der gesamten Wertschöpfungskette, entwickelte eine Blaupause für eine 500 MW Offshore-Wasserstoff-Produktionsplattform sowie ein Transportkonzept für Druckwasserstoff. Zusätzlich wurde ein detailliertes technisches

Schon in absehbarer Zukunft wird Wasserstoff in Deutschland eine zunehmend bedeutende Rolle im Energiesystem spielen, insbesondere in der Sektorkopplung. Verbrauchsseitig werden nachhaltige Prozessrouten in der Industrie und der Mobilität die größten Treiber sein. Die CO₂-freie Wasserelektrolyse wird die Schlüsseltechnologie für die Sektorkopplung und die dritte Phase der Energiewende in Deutschland werden. Zusammen mit den entsprechenden politischen Rahmenbedingungen unterstützt die Fraunhofer-Forschung hin zu einem technologischen Reifestadium, der die Wasserstoffzukunft in Deutschland garantiert.«



Dr. Tom Smolinka
Abteilungsleiter
für Elektrolyse und
Wasserstoffinfrastruktur
Fraunhofer-Institut für Solare
Energiesysteme ISE

Konzept und eine techno-ökonomische Analyse erstellt. Die Ergebnisse zeigten, dass Offshore-Wasserstoff-Erzeugung mittels PEM-Elektrolyse sowohl technisch als auch ökonomisch machbar ist und zur Diversifizierung der europäischen Wasserstoffherzeugung beiträgt. Besonders für Länder wie Deutschland, in denen die großtechnische Erzeugung von grünem Wasserstoff aufgrund von Landnutzungskonkurrenz bereits eine Herausforderung darstellt, eröffnet die Wasserstoffherzeugung auf dem Meer mithilfe der Offshore-Windenergie eine zusätzliche Option.

entwickelt und testet das Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme IKTS den Einsatz einer verfahrenstechnischen Verschaltung von eigenen SOE-Stacks zur Synthesegasproduktion für die Haber-Bosch-Ammoniaksynthese durch Elektrolyse von Wasserdampf/Stickstoff-Gemischen und untersucht die dabei auftretenden Degradationsphänomene. Diese Festoxidzellen (Solid Oxide Electrolysis, SOE) arbeiten bei Temperaturen zwischen 500 und 850 °C.

H2Meer – Effiziente, selektive und flexible Erzeugung von Wasserstoff aus Meerwasser

Das übergeordnete Ziel des H2MEER-Projekts, das am Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM erforscht wird, ist die Entwicklung kostengünstiger und effizienter Elektrolyseure für die Erzeugung von grünem Wasserstoff direkt aus Meerwasser oder salzhaltigem Wasser zur Herstellung von grünem Wasserstoff. Erreicht werden soll dies durch neue kostengünstige Komponenten wie Katalysatoren, porösen Elektroden und neu entwickelten Membran- und Separatormaterialien. Darüber hinaus wird der optimierte Betrieb von Meerwasserelektrolyseuren erforscht und getestet und später eingesetzt werden. Langzeittests mit Zellen im Labormaßstab in Kombination mit simulierten Offshore-Stromeinspeisungen werden die Robustheit und Eignung des neuen Systems verifizieren.

Ein wichtiges Teilziel ist die Entwicklung von stabilen Materialien und Komponenten, die eine lange Lebensdauer bei hoher Leistung und Selektivität gewährleisten können. Die lange Lebensdauer ist wichtig, um einen wirtschaftlichen Vorteil für

BMBF-Projekt GreatSOC – Grüne Ammoniaksynthese und -Nutzung für den Seeverkehr durch SOC-Technologie (Haber-Bosch-Ammoniaksynthese durch Elektrolyse von Wasserdampf/Stickstoff-Gemischen)

Ein Großteil der Stromerzeugung aus Wind- und Solarenergie erfolgt nicht unmittelbar am Ort des Energiebedarfs. Daher ist die Entwicklung flexibler Energieträger mit hohen Kapazitäten entscheidend, um Energie zu speichern und ortsunabhängig und bedarfsgerecht abzurufen. Dafür eignet sich insbesondere Ammoniak, das gekoppelt an die Wasser-Elektrolyse von grünem Wasserstoff emissionsfrei in einer Haber-Bosch-Synthese erzeugt wird – mit dem Vorteil einer hohen volumetrischen und gravimetrischen Energiedichte und Transportfähigkeit in Großtanks. Ammoniak kann direkt genutzt oder wieder in Wasserstoff umgewandelt werden. Damit kann es eine wichtige Rolle bei der Etablierung einer Wasserstoffwirtschaft spielen. Im vom Bundesministerium für Bildung und Forschung finanzierten Projekt GreatSOC



Projekt Offsh2ore

¹ Projektpartner: Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, PNE AG (Projektkoordinator), SILICA Verfahrenstechnik GmbH, KONGSTEIN GmbH, Wystrach GmbH

die Technologie der Meerwasserelektrolyse und ihren Einsatz in einer Offshore-Power-to-Gas-Anlage im Vergleich zu alternativen Verfahren zu erzielen. Dies wird im Rahmen des Projekts in einer technisch-wirtschaftlichen Studie auf der Grundlage der erzielten Ergebnisse analysiert werden. Von besonderer Bedeutung ist hierbei die Entwicklung von korrosionsstabilen Komponenten für den gesamten Stack. Hier werden umfassende Untersuchungen durchgeführt, um neue Materialien für den Einsatz in der direkten Meerwasserelektrolyse zu nutzen.

Techno-ökonomischen Bewertungen und Lebenszyklusanalysen

Die effiziente und wirtschaftlich sinnvolle Nutzung von grünem Wasserstoff in verschiedenen Sektoren erfordert ein umfassendes Verständnis aller einzelnen Elemente der Wasserstoffversorgungskette. In technisch-ökonomischen Analysen entwickeln und bewerten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme maßgeschneiderte Lösungen für die Produktion von sauberem Wasserstoff aus erneuerbaren Energien, seine effiziente Speicherung und bedarfsgerechte Verteilung.

Die am Fraunhofer ISE entwickelte Toolbox »H2ProSim« ist ein umfangreiches Werkzeug zur simulationsgestützten, techno-ökonomischen Bewertung von Wasserstoffanlagen und -versorgungsketten unter Verwendung der Simulationsumgebung »Matlab/Simulink/Stateflow«. Die Toolbox ist modular aufgebaut und wird ständig weiterentwickelt. Eine hohe Genauigkeit ist durch eine umfassende Datenvalidierung aus Forschungs- und Entwicklungsprojekten und eigenen Forschungsplattformen gegeben. Ein integriertes Kostenmodell ermöglicht die Berechnung der Wasserstoffproduktionskosten.

Von Machbarkeitsanalysen über Anlagenplanungen und -optimierungen bis hin zu Wasserstoff-Ertragsprognosen wird die Toolbox »H2ProSim« entlang der gesamten Wasserstoff-Wertschöpfungskette eingesetzt werden.

Ein zunehmend wichtiges Thema ist Life Cycle Analysis – also die Erfassung von Energie- und Stoffflüssen über den ganzen Lebenszyklus von Produkten, um Unternehmen und öffentliche Entscheidungsträger zu beraten. Am Fraunhofer ISE beschäftigt sich ein interdisziplinäres Team mit der Nachhaltigkeitsbewertung (nach ISO 14040/44) entlang der kompletten Wasserstoffproduktionskette von der Erzeugung über den Transport bis zur stofflichen oder energetischen Verwertung in Industrie und Verkehr.

Design of Tomorrow: Entwicklung von Elektrolyse-Stacks für die automatisierte Fertigung

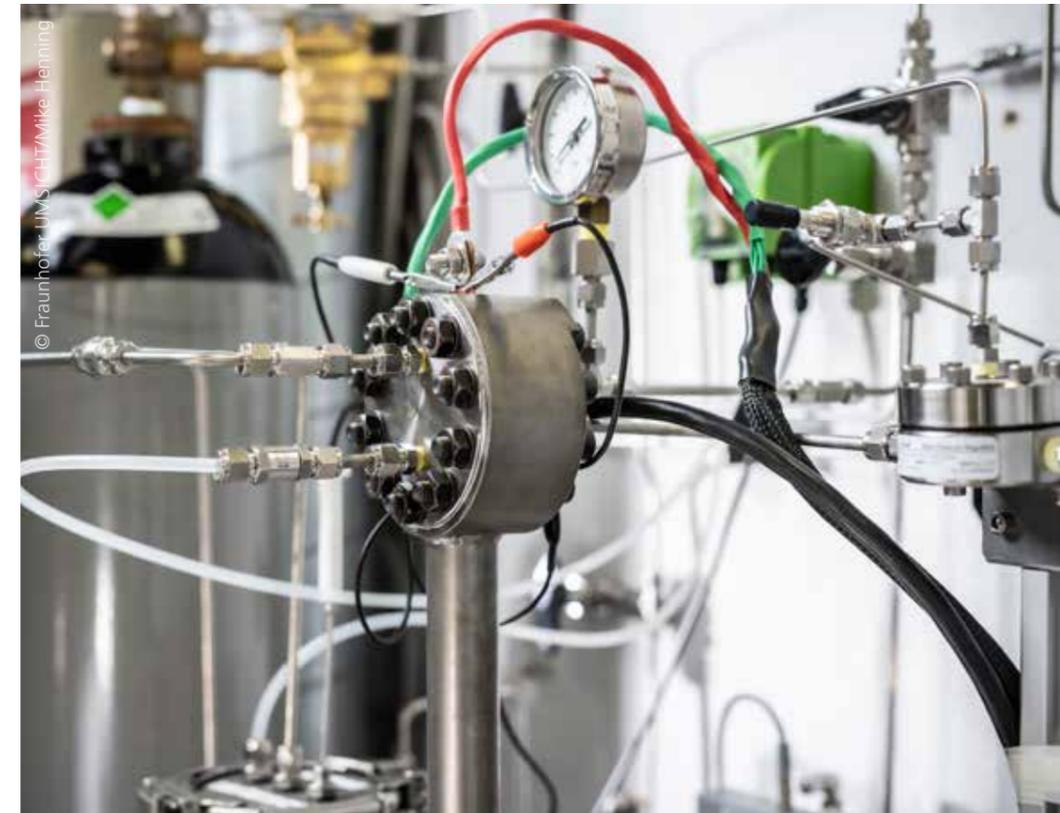
Zurzeit werden PEM-Elektrolyse-Stacks mit einem geringen Automatisierungsgrad vornehmlich in Handarbeit assembliert. Ziel dieses Projekts ist die Weiterentwicklung neuer Stack-Designs, um hohe Automatisierungsgrade und Taktfrequenzen von wenigen Hertz zu ermöglichen. Die Forschung wird im Rahmen des BMBF-Leitprojekts H2Giga durchgeführt. In H2Giga arbeiten neben 130 anderen beteiligten Institutionen das Fraunhofer IWU, IPT, IPA, ENAS, IMWS und UMSICHT. Alle mit dem gemeinsamen Ziel, Elektrolyseure in die Serienfertigung zu bringen.

Beim Fraunhofer UMSICHT wird ein innovatives, dichtungsfreies Stack-Design auf Basis von verschweißten Zellverbänden entwickelt. Als »Design of Tomorrow« soll das dichtungsfreie Konzept eine hochautomatisierte Fertigung aus Halbzeugen ermöglichen. Die Stack-Produktion soll dabei im Wesentlichen an einem Standort möglich sein, um lange Lieferketten zu vermeiden.

Das Fraunhofer ISE unterstützt Industriepartner bei der konzeptionellen Entwicklung einer Fertigungsline für die Stackproduktion, sowie bei der eigentlichen Entwicklung eines großflächigen Stacks mit konventionellem Design. Dazu gehören u.a. Untersuchung des Optimierungspotenzial aller Komponenten im Stack, Qualifizierung und Quantifizierung von Komponenten und Komponenteneigenschaften, Entwicklung von Korrosionsschutzschichten für metallische Komponenten und Integration des Prozessschrittes in die Fertigung, Definition und Test von Prüfprotokollen in der Stackproduktion, Mitarbeit beim »Design of Tomorrow«, Entwicklung von Testabläufen und -anlagen sowie Betriebsabläufen innerhalb des Produktionsflusses einer automatisierten Serienfertigung von PEM-Stacks.

Grünes Methanol für die Schifffahrt mittels Co-Elektrolyse

Der Klimawandel erzwingt eine ambitioniertere Reduktion des CO₂-Ausstoßes. Deutschland und EU haben verbindliche Ziele für Verkehrssektor und Quoten für erneuerbare Kraftstoffe vorgegeben. Schwer zu elektrifizierende Bereiche wie Schiffs- und Luftverkehr haben aber keinen technisch etablierten Weg, dies ökonomisch zu erfüllen. Alternative Kraftstoffe auf Basis von H₂ und CO₂ (eFuels) bieten eine skalierbare Alternative, sind aber nicht bereit für den Markthochlauf. Ziel des Projektkonsortiums² ist daher die Entwicklung einer Prozesskette zur Herstellung von strombasiertem Methanol (eMethanol) aus CO₂. CO₂ wird aus industriellen Prozessemissionen, welche theoretisch RED II-konform als grün einstuftbar sind.



Niedertemperatur-CO₂-Elektrolyseur am Fraunhofer UMSICHT

Fraunhofer UMSICHT entwickelt in diesem Projekt einen Prototyp einer neuen Niedertemperatur-Co-Elektrolyse (NTCE) basierend auf einer Polymerelektrolytmembran. Dieser erzeugt Synthesegas in variabler Zusammensetzung mittels Elektrolyse von Wasser und CO₂ bei Temperaturen < 100 °C. Die NTCE wird im Projekt samt Elektrolyse-Stack und Balance-of-Plant auf die Integration in die Prozesskette entwickelt und in modularer Containerbauweise aufgebaut. Entwicklungsschwerpunkte liegen auf der Evaluierung geeigneter Prozessführungen und Gasreinigungsprozesse mit dem Ziel eines resilienten Betriebs auch beim Einsatz unter flexiblen Lasten ohne die Qualität des produzierten Synthesegases negativ zu beeinflussen.

»VerKEI« – Verschleißfeste keramische Elektroden für Elektrolyseure zur Erzeugung von Wasserstoff

Zur dezentralen Erzeugung von Wasserstoff in kleinen und mittelgroßen Anlagen stehen als am weitesten entwickelte Technologien die PEM und die alkalische Elektrolyse zur Verfügung. Die PEM-Elektrolyse erreicht höhere Leistungsdichten, ist

aber auf seltene und teure Katalysatormaterialien angewiesen. Die alkalische Elektrolyse ist für die Anwendung in der zukünftig notwendigen Größenordnung besser geeignet, da sie mit günstigen, gut verfügbaren Katalysatormaterialien auskommt.

Am ISC-HTL sollen im Projekt³ wartungsarme, bzw. wartungsfreie Elektrolysezellen aus keramischen Werkstoffen für den Einsatz in kleinen Elektrolyseuren mit einer Nennleistung zwischen 1 kW und 100 kW mit hoher Umweltverträglichkeit und niedrigem Preis entwickelt werden. Die Nutzung keramischer Werkstoffe anstelle von bisher üblichen Nickel-Stahlblechen soll spezifische Vorteile carbidischer und nitridischer Keramiken nutzen und dadurch Herstell- und Betriebskosten reduzieren.

Neuartige Elektroden sollen auf Basis leitfähiger Keramiken und faserverstärkten keramischen Verbundwerkstoffen als Ersatz für die bisher üblichen stahlbasierten Elektroden entwickelt werden. Dabei muss vor allen eine Verbesserung der elektrischen Leitfähigkeit, sowie eine Anpassung für möglichst große aktive Oberflächen für eine ausreichende Zu- und Abfuhr des Elektrolyts und der Spaltprodukte erfolgen.

² Projektpartner: Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT, Fraunhofer Institut für Windenergiesysteme IWES, C1 Green Chemicals AG (Projektkoordination), DBI – Gasttechnologisches Institut Freiberg gGmbH, Technische Universität Berlin

³ Projektpartner: Fraunhofer Zentrum für Hochtemperatur Leichtbau, FZ Jülich GmbH, Rauschert GmbH, PS-HyTech GmbH, Ostermeier Hydrogen Solutions GmbH



Methanol und Ammoniak als essenzielle Bausteine für die chemische Industrie und Mobilität

Synthetische Kraftstoffe und Wasserstoffträgermaterialien

Ammoniak und Methanol sind wichtige Basischemikalien, auf die wir auch in Zukunft nicht verzichten können. Gleiches gilt für Kraftstoffe mit hoher Energiedichte, die für bestimmte Anwendungen, wie zum Beispiel in der Schifffahrt sowie in der Luftfahrt, weiterhin erforderlich sind.

Allerdings tragen die bei der klassischen Produktion von Ammoniak oder Methanol sowie bei der Verbrennung von Kraftstoffen aus fossilen Ressourcen entstehenden Emissionen erheblich zum Klimawandel bei. Durch die Nutzung von grünem Wasserstoff für die Herstellung dieser Produkte und zum Beispiel gleichzeitiger Verwendung von CO_2 , können die CO_2 -Emissionen signifikant gesenkt und gleichzeitig wichtige Ausgangsstoffe unter anderem für Industrie und Landwirtschaft bereitgestellt werden.

Daneben bieten feste und flüssige Wasserstoffverbindungen auch die Chance, Wasserstoff in stofflicher Form langfristig zu speichern und zu transportieren. Ein wesentlicher Schlüssel für die Realisierung einer solchen Wasserstoffinfrastruktur liegt in effizienten Herstellungs- und Rückwandlungsprozessen sowie der Entwicklung von Technologien zur energetischen und stofflichen Nutzung dieser Derivate.

Methanol – Synthese und Reformierung

Die global produzierte Menge Methanol beträgt aktuell ca. 90 Millionen Tonnen pro Jahr. Die Herstellung basiert hauptsächlich auf Erdgas. Dass die Herstellung auch mit CO_2/H_2 oder $\text{CO}/\text{CO}_2/\text{H}_2$ -Gemischen gelingen kann, wurde beispielsweise im Verbundprojekt »Carbon2Chem« gezeigt, welches unter Koordination von Fraunhofer UMSICHT, thyssenkrupp und dem Max-Planck-Institut für Chemische Energiekonversion geleitet wurde.

Dort wurde von Fraunhofer UMSICHT und Fraunhofer ISE gemeinsam mit den Verbundpartnern nachgewiesen, dass die Gasreinigung und die katalytische Methanolherstellung auch unter volatilen Betriebsbedingungen erfolgreich betrieben werden können.

Fraunhofer UMSICHT und ISE untersuchten im Projekt in mehreren tausend Versuchsstunden mit ihren Labor- und Technikumsanlagen die Skalierung und die Langzeitstabilität der Methanolsynthese insbesondere unter volatilen Betriebsbedingungen auch mit gereinigten realen Hüttengasen. Die Kapazitäten der Anlagen betragen zwischen 50 mL/h bis 50 L/d.

Die Ergebnisse wurden genutzt, um in Prozesssimulationen die Kinetik für die Methanolsynthese aus solchen unkonventionellen Gasen zu ermitteln und so eine detaillierte Prozessauslegung zu ermöglichen. Durch die experimentellen Untersuchungen und Simulationen kann der Prozess auch auf andere Gasquellen übertragen werden. Gleichzeitig ist es möglich, den Syntheseprozess auch in anderen Umgebungen zu simulieren und so eine Sektorenkopplung zwischen Produktion, Chemie und Energie zu realisieren. Mit der im Projekt weiterentwickelten Co-Simulationsplattform SimuNet steht ein Werkzeug zum Scale-up sowie zur Prozessoptimierung zur Verfügung.

Die Bereitstellung von geeigneten Synthesegasen aus $\text{CO}/\text{CO}_2/\text{H}_2$ für die Methanolsynthese kann ebenfalls durch die Elektrolyse von CO_2 aus beispielsweise verunreinigten Prozessgasen erfolgen. Dahingehend entwickelt das Fraunhofer UMSICHT Verfahren zur direkten Co-Elektrolyse von CO_2 und H_2O bei niedrigen Prozesstemperaturen zur Kopplung mit volatilen Energiequellen wie Wind oder Photovoltaik. Gegenstand der Forschung und Entwicklung ist dabei unter anderem die Skalierung der Technologie in den kW-Maßstab und die Integration zunächst mit Up-Stream-Prozessen wie einer Aminwäsche zur Bereitstellung von CO_2 im Projekt »Power-to-X-Plattform«. Des Weiteren werden im Projekt » CO_2 -Syn« neuartige Elektroden- und Katalysatormaterialien für die direkte Nutzung von Zementwerkprozessgasen entwickelt und die Niedertemperatur-Co-Elektrolyse in einer Laboranlage mit einem Folgeprozess zur Alkoholsynthese gekoppelt.

Das Fraunhofer IMM entwickelt in mehreren Projekten Methanolreformer für mobile und dezentrale stationäre Anwendungen, die durch Wasserdampfpreformieren mit hoher Effizienz Wasserstoff aus Methanol erzeugen. Diese Anlagen können beispielsweise für die Wasserstoffversorgung von Brennstoffzellen bis zu einem Leistungsbereich von mehreren 100 kW eingesetzt werden. Durch entsprechende Reinigungsschritte können sowohl Niedertemperatur- als auch Hochtemperatur-PEM-Brennstoffzellen versorgt werden.

Ammoniak – Synthese, Spaltung und Nutzung

Mit einer Produktion von 180 Millionen Tonnen jährlich ist Ammoniak einer der bedeutendsten nicht fossilen Rohstoffe. Auch wenn das Molekül keinen Kohlenstoff beinhaltet, so basiert der enthaltene Wasserstoff meist auf Erdgas, weshalb die Ammoniaksynthese für etwa 2 bis 3 % der globalen CO_2 -Emissionen verantwortlich ist. Da es aber auch der wichtigste



Methanolanlage zur Konversion von kohlenstoffreichen Gasen des Fraunhofer UMSICHT im Rahmen des Projekts Carbon2Chem®

Grundstoff für Düngemittel ist, können wir bei steigender Bevölkerung nicht darauf verzichten. Allerdings lässt sich der eingesetzte Wasserstoff durch grünen Wasserstoff ersetzen. Der für die Herstellung notwendige Stickstoff kann aus der Luft gewonnen werden. Zudem wird an neuen Verfahren geforscht, die insbesondere an dezentralen Standorten die bekannte Haber-Bosch-Synthese ersetzen können.

Im Projekt Process Intensification & Advanced Catalysis for Ammonia Sustainable Optimized Process (»PICASO«) arbeitet das Fraunhofer ISE gemeinsam mit Partnern an einem neuartigen Power-to-Ammonia (PtA) Prozess für die nachhaltige Ammoniaksynthese. Das Verfahren könnte die CO_2 -Emissionen im Vergleich zum konventionellen Haber-Bosch-Prozess um 95 % senken. Das Hauptziel von PICASO ist die Entwicklung einer integrierten Reaktortechnologie und dynamischer Betriebsstrategien für einen flexiblen Ammoniaksyntheseprozess auf Basis von erneuerbarem, grünem Wasserstoff, die auch für die Implementierung in abgelegenen Regionen geeignet sind. In einem Folgeprojekt soll die Hochskalierung des integrierten Reaktors auf Demonstrationsniveau und dessen Erprobung in einer Pilotanlage erfolgen.



Methanol-Miniplant-Anlage
(Bildquelle: Fraunhofer ISE)

Das Fraunhofer IMM befasst sich im Rahmen mehrerer Projekte mit dem Einsatz von Ammoniak für Anwendungen im mobilen und stationären Bereich und mit der Katalysator- und Reaktor-entwicklung für die Ammoniakzerersetzung und dessen homogene Verbrennung sowie nachgeschalteten Wasserstoffreinigungstechnologien (Projekte »Ammoniaktor«, »ShipFC«, »Spaltgas« und weitere). Hierbei kommt eine Plattenwärmeübertragertechnik mit beschichteten Katalysatoren zum Einsatz, die sowohl eine hohe Systemeffizienz von bis zu 90 % ermöglicht als auch eine Größenreduzierung der Anlagen um ebenfalls 90 %

Ammoniak ist nicht nur ein wichtiger Grundstoff, sondern stellt auch eines der potenziell wichtigsten Trägermoleküle für Wasserstoff dar. Insbesondere bei großen Mengen und langen Strecken über See erscheint der Transport in Form von Ammoniak derzeit am wirtschaftlichsten. Somit bietet Ammoniak die vielversprechende Möglichkeit, Energie aus Regionen der Welt zu transportieren, wo diese günstiger verfügbar ist als beispielsweise in Deutschland. Ammoniak spielt daher eine zentrale Rolle bei der zukünftigen Versorgung mit bezahlbarer Energie. Ein entscheidender Punkt vor einer erfolgreichen Realisierung ist derzeit noch die Entwicklung von Verfahren für die effiziente Wasserstoffgewinnung aus Ammoniak. Hier arbeitet Fraunhofer an der Entwicklung effizienter Verfahren und Katalysatoren für die Ammoniakreformierung. Beispielsweise wurde am Fraunhofer UMSICHT im Rahmen des Leistungszentrums DYNAFLEX® ein Verfahren für die direkte elektrische Beheizung des Trägermaterials entwickelt, wodurch der Prozess ohne CO₂-Emissionen und ohne die Verbrennung von Ammoniak selbst betrieben werden kann, was die Effizienz der gesamten Prozesskette von der Wasserstoffherstellung über Transport und Nutzung deutlich steigert. Das Fraunhofer ISE hat mit der Plattform ELIAS (Electrically Heated Catalysts Carriers) für endotherme Reaktionen ein wertvolles Tool entwickelt, um sie in sehr kompakten Reaktoren umzusetzen. Gleichzeitig entwickeln das Fraunhofer ISE sowie das Fraunhofer UMSICHT neue Katalysator- und Trägermaterialien zur Reduzierung der Prozessstemperatur. Die Gewinnung von reinem Wasserstoff stellt dabei nur eine Alternative des Verfahrens dar. Auch für die energetische Nutzung oder die Nutzung in einer Brennstoffzelle kann es sinnvoll sein, zumindest einen Teil des Ammoniaks zu cracken und es danach zu verbrennen oder in einer Brennstoffzelle CO₂-frei in Strom und Wärme umzuwandeln.

Synthetische Kraftstoffe

Während Ammoniak und Methanol selbst als Kraftstoffe eingesetzt und zukünftig insbesondere in der Schifffahrt eine wichtige Rolle einnehmen werden, bietet gerade Methanol noch eine Vielzahl weiterer Möglichkeiten Kraftstoffe zu synthetisieren. Beispielsweise kann aus Methanol DME (Dimethylether) oder OME (Polyoxymethylendimethylether) für die Nutzung in Dieselmotoren synthetisiert werden. OME kann in der bestehenden Infrastruktur eingesetzt werden, insbesondere als Alternative oder Zusatz zu Dieselmotoren, was zu einer erheblichen Verringerung der lokalen Emissionen (z. B. Ruß und NOx) führt. Im Projekt »NAMOSYN« hat das Fraunhofer ISE an der Entwicklung von Prozessen zur Herstellung der OME bis in den Maßstab von einer Million Tonnen pro Jahr gearbeitet. Parallel dazu wurde die Verwendung und die Kompatibilität dieser OME mit dem Verbrennungsmotor unter Laborbedingungen und in der Praxis untersucht. Diese Arbeiten sind abgeschlossen und veröffentlicht. Über den Methanol-to-Gasoline-Prozess kann die Energiedichte signifikant gesteigert und ein vollständig kompatibler Ottokraftstoff hergestellt werden. Weitere vielversprechende Einsatzmöglichkeiten bietet auch die so genannte Methanol-to-Jet Route. Dabei bildet Methanol die Basis für die Herstellung von Kerosin, indem daraus zuerst Olefine synthetisiert werden, die anschließend oligomerisiert und dann hydriert werden. Im Forschungsvorhaben »Sustainable Aviation Fuels based on Advanced Reaction and Process Intensification« (SAFari) wird ein Konsortium aus Forschungsinstituten und Industriepartnern unter Projektleitung des Fraunhofer ISE nachhaltig Kerosin aus Methanol in einer Pilotanlage herstellen und testen. Das Projekt soll dazu beitragen, die vollständige Marktzulassung dieser methanolbasierten Prozessroute durch die American Society for Testing and Materials (ASTM) zu ermöglichen.

POWERPASTE ist eine Suspension aus einem festen Wasserstoffträgermaterial (MgH₂) und kann drucklos, bei normaler Temperatur unter Abschluss von Feuchtigkeit gelagert werden. Zur Freisetzung des Wasserstoffs wird lediglich Wasser hinzugegeben.«



Dr.-Ing. Felix Heubner
Abteilungsleiter Wasserstofftechnologie,
Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik
und Angewandte Materialforschung IFAM

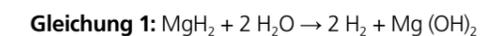
Während bei der Rohstahlproduktion durch den Einsatz von grünem Wasserstoff die CO₂-Emissionen weitgehend vermieden werden können, besteht bei unvermeidbaren prozessbedingten Emissionen, wie sie vor allem bei der Kalk- und Zementproduktion anfallen, die Möglichkeit, das CO₂ über keramische Membranen abzutrennen und zur Erzeugung hochwertiger Produkte zu nutzen. Im Projekt »WaTTh« baut das Fraunhofer IKTS basierend auf der eigenen Hochtemperatur-Co-Elektrolyse eine vollautomatisierte Demonstrationsanlage, in der aus CO₂ und Wasser flüssige Kohlenwasserstoffe und Wachse über die Fischer-Tropsch-Synthese erzeugt werden. Diese können zum Einsatz in der chemischen Industrie sowie für die Herstellung von synthetischen Kraftstoffen wie e-Kerosin genutzt werden. Die Kapazität der Anlage liegt bei jeweils 8 L an flüssigen Produkten und Wachsen pro Tag. Mittels der entwickelten Tools zur Prozesssimulation arbeiten die Forschenden aktuell am Scale-up der Verfahren für den industriellen Maßstab.

Solid Hydrogen Carriers und POWERPASTE

Im Gegensatz zu Druckgas- oder Flüssig-Wasserstoffspeichern stellen Metallhydride als H₂-Feststoffspeichermaterialien, auch Solid Hydrogen Carriers (SHC) genannt, eine ökonomisch vielversprechende Option dar, Wasserstoff mit höchster Reinheit (7.0) unter niedrigem Betriebsdruck (2 bis 40 bar), auf engem Raum (bis zu 0,15 kg H₂/dm³) und ohne Abdampfverluste sicher zu speichern. In SHC ist Wasserstoff chemisch an ein solides Trägermaterial gebunden, so dass bei Leckagen des Speichers der gebundene Wasserstoff nicht schlagartig, sondern nur sehr langsam austritt. Damit ist eine sehr hohe Systemsicherheit von SHC-Speichern gegeben. Hydride bieten weitere Einsatzfelder in der Wasserstofftechnologie wie zum Beispiel die thermo-chemische Kompression von Wasserstoff und auch die Aufreinigung von wasserstoffhaltigen Gasgemischen.

Neben der reversiblen Thermolyse ist mit Metallhydriden eine Hydrolyse-reaktion, d. h. Zersetzung des Hydrids durch eine

Reaktion mit Wasser, möglich. »POWERPASTE« ist eine Suspension aus Magnesiumhydrid, einem Metallsalz als Katalysator und einem Ester zur Fluidisierung. Magnesiumhydrid reagiert mit Wasser exotherm unter Freisetzung von Wasserstoff. Als Nebenprodukt entsteht ungiftiges Magnesiumhydroxid (siehe Gleichung 1). Bemerkenswert für die technische Anwendung ist die Mitnutzung des Wassers zur Wasserstoffherzeugung – und demzufolge die Verdopplung der Menge an erzeugtem Wasserstoff pro Äquivalent Metallhydrid.



POWERPASTE kann drucklos und bei normaler Temperatur unter Abschluss von Feuchtigkeit gelagert werden. Zur Freisetzung des Wasserstoffs sind Wasserstoffgeneratoren notwendig, die die Paste mit dem Wasser zusammenführen. Mit Partnern aus Industrie und Forschung werden mehrere Demonstratoren und Prototypen zur Wasserstoffherzeugung für verschiedene Einsatzzwecke (stationär, portabel, mobil) in den Leistungsklassen 500 bis 1.000 W am Fraunhofer IFAM entwickelt. Die Wasserstoffgeneratoren werden dabei mit PEM-Brennstoffzellen der entsprechenden Leistungsklasse gekoppelt. Die aktuellen Entwicklungen betreffen zum einen gewichtsseitige Optimierungen für mobile Anwendungen, um auch auf Systemebene eine möglichst hohe spezifische Energie zu erreichen. Meilensteine für die Technologie wurden zum Beispiel 2022 erreicht: Auf der Hannover Messe wurde gemeinsam mit der Grünland Innovations GmbH ein autarkes Powerpaste-basiertes Notstrom-System vorgestellt. Neben stationären Anwendungen werden in öffentlich geförderten Projekten auch mobile Anwendungen bearbeitet und demonstriert (»PowerPaste – Mobile Wasserstoffversorgung der nächsten Generation« (BMW)). Weiterhin ist die Erhöhung der Hydrolyseleistung ein weiterer wichtiger Gegenstand laufender Projekte, um auch neue Anwendungsfelder zu erschließen. Das Up-Scaling der Produktion von POWERPASTE wird im Fraunhofer-Projektzentrum für Energiespeicher und Systeme ZESS in Braunschweig bearbeitet. 2023 sollen bis zu 5 t POWERPASTE am ZESS für Pilotanwendungen produziert werden.



Wasserstoffverteilnetze, Pipelines und innovative Speicherlösungen

Wasserstoff-Infrastrukturen

Die Transformation des Energiesystems mit dem Ziel der Treibhausgasneutralität bis 2045 stellt eine große Herausforderung dar. In allen Nachfragesektoren besteht großer Handlungsbedarf. Der zunehmende Anteil an Erneuerbaren Energien bei der Erzeugung von Strom und Wärme bedingt die Notwendigkeit von geeigneten Speicher- und Sektorkopplungsoptionen für eine effiziente Ausgestaltung des Energiesystems.

In der nationalen Wasserstoffstrategie (NWS) der Bundesregierung wird auf grünen Wasserstoff als wesentlichen Baustein gesetzt, um den Energiebedarf in Deutschland flächendeckend klimaneutral zu sichern. Die NWS zeigt, dass die Nutzung von grünem H₂, neben Energieeffizienz und der direkten Nutzung der Erneuerbaren, eine zentrale Rolle bei der Transformation der Industrie, des Verkehrssektors und der Energiewirtschaft hin zu Nachhaltigkeit und Klimaneutralität einnimmt. Die sehr ambitionierten Ziele in allen Sektoren bis 2030 und 2045 können nicht erreicht werden, wenn Wasserstoff und seine Derivate nicht in erheblichen Mengen ins System gebracht werden. Dies ist in der Nationalen Wasserstoffstrategie klar erklärt. Daraus ergibt sich, dass im Jahr 2030 alleine aus inländischer Erzeugung etwa 30 TWh bzw. ca. 1 Mio. t Wasserstoff pro Jahr zu handhaben und zu verteilen sind. Für die vollständige Defossilisierung des

nationalen Energiesystems wird dieser Wert noch erheblich höher liegen. Für diese Dimension von Mengen muss bereits in 2030 ein entsprechendes Transport- und Verteilernetz existieren.

TransHyDE – Speicher und Transportlösungen für Grünen Wasserstoff

Das Wasserstoff-Leitprojekt TransHyDE, mit seinen fünf Forschungs- und vier Umsetzungsverbänden erarbeitet Lösungen, wie ideale Wasserstoff-Infrastrukturen beschaffen sein sollten, um größtmögliche Effizienz und Resilienz zu schaffen. Im technologischen Zentrum von TransHyDE steht die Erforschung und Entwicklung von Transport- und Speicheroptionen für gasförmigen und flüssigen Wasserstoff, Ammoniak sowie flüssige



organische Träger (Liquid Organic Hydrogen Carrier, LOHC). Die erarbeiteten Ergebnisse fließen direkt in Roadmapping Prozesse für die Entwicklung einer Wasserstoffinfrastruktur bis 2045 sowie die Schließung von Normierungs-, Standardisierungs-, Zertifizierungs- und regulatorischen Lücken ein. Koordiniert wird das Leitprojekt u.a. vom Fraunhofer IEG.

Die Fraunhofer Institute IEE, IEG, IFF, IKTS, ISE, ISI und SCAI erarbeiten im Verbund Systemanalyse des Wasserstoff-Leitprojekts eine Einordnung der jeweiligen Transporttechnologieoptionen in das Gesamtsystem. Diese Analyse berücksichtigt die räumliche und zeitliche Entwicklung von Angebot, Bedarf und verknüpfender Transport- und Logistikinfrastruktur für grünen H₂ auf nationaler und EU-Ebene, ebenso wie die daraus entstehenden Wechselwirkungen zu Strominfrastrukturen und anderen Energieträgern.

Im Verbund Sichere Infrastruktur erarbeiten die Fraunhofer Institute IEG, IPM und IWM Konzepte und Methoden zur Bewertung von Werkstoffen und Bauteilen im Kontakt mit H₂-Gas und deren Eignung für einen unfallsicheren und dauerhaften Einsatz unter praxisnahen Bedingungen in einer realen H₂-Transportinfrastruktur. Sie entwickeln Gassensoren und Sensorsysteme zur Gewährleistung der Sicherheit von H₂-Infrastrukturen und Komponenten und erproben die Sensorik unter praxisnahen Bedingungen am Prüfstand.

Das Fraunhofer ISE erforscht im Verbund AmmoRef eine anwendungsbezogene, industriell umsetzbare, sichere und kostengünstige Technologie zur Reformierung von Ammoniak.

Die Erforschung von Wasserstoff-Pipeline-Beschichtungen, Bewuchsschutz sowie optimierten Beschichtungs- und Klebesystemen für LOHC-Speicher ist Arbeitsschwerpunkt des Fraunhofer IFAM im TransHyDE Verbund Helgoland.

Speicherung von Wasserstoff als Flexibilitätsoption

Die Speicherung von Wasserstoff ist ein wesentlicher Baustein zur Umsetzung der Energiewende. Denn Wasserstoff kann nur dann eine Flexibilitätsoption darstellen, wenn die zeitlich voneinander abweichende Wasserstoffnachfrage und –erzeugung ausgeglichen werden können. Der geologische Untergrund sowie physikalische und chemische Speichertechnologien bieten Möglichkeiten zur Speicherung von Wasserstoff. Die Kohlenwasserstoffindustrie nutzt den Untergrund schon seit Jahrzehnten in Deutschland und der Welt, um große Mengen an Erdgas im Porenraum der Gesteine (sog. „Porenspeicher“) oder in Salzkavernen zu lagern. Insgesamt werden in Deutschland rund 24 Milliarden Kubikmeter Erdgas im Untergrund gespeichert. Damit besitzt Deutschland nach den Vereinigten Staaten, Russland und der Ukraine die viertgrößten Speicherkapazitäten weltweit.

Im Projekt „H₂-Forschungskaverne“ entwickelt das Fraunhofer IMWS eine H₂-Speicherforschungsplattform für die großindustrielle Untergrundgasspeicherung von grünem Wasserstoff in Salzkavernen am Standort Bad Lauchstädt. Das Vorhaben ist in die Forschungsinitiative HYPOS eingebettet.

Im Projekt H₂-Sponge »H₂-Speicherpotenzial geologischer Gesteinsformationen« werden die Voraussetzungen für eine zukünftige sichere Untergrundspeicherung von Wasserstoff im Porenraum von Gesteinen geschaffen. Wesentliche Fragestellungen betreffen die geologischen Anforderungen an die Speicherung, die Priorisierung von Standorten und die experimentelle Untersuchung von Gesteinen im Kontakt mit Wasserstoff. Zu diesem Zweck werden zwei neuartige Wasserstoffprüfstände entwickelt, mit denen der Speicherprozess im Untergrund simuliert werden kann. Zum einen gilt es, in



Poröse Gesteinsprobe eingebracht in den H_2 -Autoklaven des Fraunhofer IEG für Versuche unter Drücken von bis zu 50 MPa und Temperaturen von bis 200°C zur experimentellen Untersuchung von Gesteins-Fluid Wechselwirkung in potentiellen Speicherhorizonten für Wasserstoff.

einem mobilen geochemischen Labor die Langzeitintegrität von Gesteinen in Kontakt mit Wasserstoff zu untersuchen. Zum anderen werden in einem Wasserstoffpermeameter und einem Wasserstoffporosimeter Experimente zu transienten Speicher- und Transportprozessen durchgeführt. Erst das Zusammenspiel dieser Versuchsstände ermöglicht eine aussagekräftige Bewertung von potenziellen Wasserstoffspeichergesteinen und der Dichtigkeit von Speichern. Weitere Aspekte, die untersucht werden, sind die strategische Planung von Monitoringkonzepten zur lückenlosen Überwachung aller Prozesse und die Entwicklung von Analysemethoden zur Integritätsbewertung von Wasserstoffspeicherbohrungen. Ziel ist es, Vorschläge für den Umgang mit Wasserstoff in geologischen Untergrundspeichern zu erarbeiten und geeignete Infrastruktur- und Sicherheitskonzepte zu entwickeln.

KuWaTa – Kugelförmige Wasserstofftanks

Im KuWaTa-Projekt des Fraunhofer HTL wurden mittels isotensoider Wickeltechnik aus kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK) kugelförmige Wasserstofftanks entwickelt. Die Hochdruckspeicher für gasförmigen Wasserstoff sind für 700 bar ausgelegt und sollen bei einem Durchmesser von 1,25m 40 kg Wasserstoff speichern. Die Verwendung der Kugelform hat deutliche Vorteile gegenüber herkömmlichen zylindrischen Tanks. Aufgrund der konstanten Spannungsverteilung auf der Kugeloberfläche können die Wandstärken im Vergleich zu bislang üblichen Zylindergeometrien deutlich verringert werden. Bei gleichem Tankgewicht können so größere Mengen an Wasserstoff gespeichert werden. Durch die Verwendung von speziellen, diffusionshemmenden Matrices und Linern wird die Masse weiter

reduziert und zusätzliche Gewichtseinsparungen werden erzielt. Das Verhältnis von Tankgewicht zu gespeichertem Wasserstoff liegt aktuell im Automotive Bereich bei 15:1. Mit dem Kugeltank wird ein Gewichtsverhältnis von 5:1 angestrebt.

Durch die Nutzung der isotensoiden Faserablage wird gewährleistet, dass alle Fasern in der Armierung nahezu äquatorial in Umfangsrichtung abgelegt werden. Dadurch wird die Druckbelastung optimal auf die Fasern übertragen und so eine bestmögliche Auslastung der hohen Faserfestigkeiten ermöglicht. Hierfür wurde im KuWaTa Projekt ein spezieller Wickelalgorithmus für ein 5Achsen-Roboter-System entwickelt. Die gleichförmige Belastung der Tankoberfläche konnte in Berstversuchen erfolgreich gezeigt werden.

Begleitung von Transformationsprozessen

Wie kann der Transformationsprozess zu einem weitgehend treibhausgasneutralen Energiesystem in Deutschland konkret aussehen? Im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie BMWi modellieren die Experten des Fraunhofer ISI Szenarien für ein kostenoptimiertes und sicheres Energiesystem und liefern damit eine wichtige Orientierungshilfe für die Diskussion um die Weiterentwicklung der Energiewende. Mit dem Nachfragemodell FORECAST untersuchten sie für die Netzbetreiber zudem die Nachfrageseite des europäischen Energiesystems.

Auch Entwickler, Unternehmen und Investoren brauchen genauere Angaben zur Wirtschaftlichkeit, bevor sie in eine Wasserstofftechnologie investieren. Energiesystem-Modellierungen aus dem Fraunhofer IEG und Fraunhofer ISE können belastbare Angaben machen – von Wasserstoffentstehungskosten, Wirkungsgrad und Wasserstoffausbeute bis hin zu Machbarkeitsstudien sowie Ertragsgutachten. Beispielsweise wird im Projekt hyBit ermittelt, wie der Einsatz von Wasserstoff in der Schwerindustrie die industriellen Wertschöpfungsketten beeinflusst.

Ob innovative Energietechnologien erfolgreich sind, hängt unter anderem von der gesellschaftlichen, politischen und wirtschaftlichen Unterstützung ab. Die gesellschaftliche Akzeptanz von Wasserstofftechnologien untersucht das Fraunhofer ISI im EU-Projekt HYACINTH. Das Projekt H_2 -Chancendialog am Center for Responsible Research and Innovation des Fraunhofer IAO zielt darauf ab, das Innovationspotenzial gesellschaftlicher Perspektiven zu identifizieren, um neue Wasserstofflösungen kollaborativ und unter Einbezug unterschiedlicher Stakeholder zu entwickeln.

Vom Import zur regionalen Verteilung

Um den Bedarf an grünem Wasserstoff decken zu können, wird Deutschland einen Großteil des grünen Wasserstoffes samt Syntheseprodukten importieren müssen, da hierzulande



Herstellung eines isotensoiden Kugeltanks im KuWaTa-Projekt

erneuerbare Energiequellen nur begrenzt zur Verfügung stehen. Unter der Leitung des Fraunhofer ISI entwickeln das Fraunhofer IEG und ISE im Projekt HYPAT einen globalen Wasserstoff-Potenzialatlas identifizieren dafür umfassend mögliche Export- und Importländer, die zugehörigen Wasserstoffexportkosten und leiten erstmals ab, zu welchen Preisen Wasserstoff global gehandelt werden könnte. Im Fokus stehen Exportpartnerschaften auf Augenhöhe - für eine gesicherte, ökonomische und ökologisch nachhaltige Produktion und Versorgung. Neben der detaillierten Erhebung der weltweiten techno-ökonomischen Potenziale und Analyse der Wasserstoffketten, schließt die Analyse die nachhaltige Deckung der eigenen Energienachfrage, das Erreichen eigener Klimaziele und das Einhalten spezifischer Nachhaltigkeitskriterien für die Wasserstoffwirtschaft der Partnerländer ein.

Neben der Identifikation geeigneter Quellenländer und Importrouten für den internationalen Bezug von Wasserstoff, ist die Entwicklung der nationalen Wasserstoffinfrastruktur von zentraler Bedeutung, um regionale Erzeuger und Verbraucher von Wasserstoff miteinander zu vernetzen.

Gemeinsam mit dem Fraunhofer ISI erarbeitete das Fraunhofer IEG im Auftrag des Ministeriums für Wirtschaft, Arbeit und Energie des Landes Brandenburg (MWAE) die Grundlagen für den Aufbau eines Wasserstofftransportnetzes im Land Brandenburg. Ziel der Machbarkeitsstudie war die Entwicklung eines übergeordneten Wasserstoffnetzes, das regionale Wasserstoff-erzeuger, -speicher und -endverbraucher miteinander verbindet und sich in eine deutschlandweite Wasserstoffinfrastruktur einfügt. Wo möglich wurde dabei auf die Umrüstung bestehender Erdgasleitungen abgestellt. Die Studie leistet einen wesentlichen Beitrag zur Konkretisierung und Umsetzung der Wasserstoffstrategie des Landes Brandenburg.

Der Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft zur Transformation der Grundstoffindustrie, des Schwerlastverkehrs und des Umwandlungssektors lässt sich nur auf Basis leistungsfähiger Wasserstoff-Infrastrukturen realisieren. Hierfür entwickeln wir die Methoden, um im Rahmen der Systementwicklungsstrategie Wasserstoff-, Strom- und Erdgasnetze integriert planen und betreiben zu können. In den Instituten und Forschungsverbänden werden alle erforderlichen Technologiekomponenten entwickelt und erprobt, so dass diese zu marktfähigen Lösungen skaliert werden können.»



Prof. Dr. Mario Ragwitz
Institutsleiter Fraunhofer IEG

© Photograph/Fraunhofer IEG



Brennstoffzellen-Fahrzeuge des Fraunhofer ISE

Nutzung von Wasserstoff-technologien in der Industrie, Strom- bzw. Wärmeerzeugung und Mobilität

Zur Erreichung der in Deutschland und Europa gesetzten Klimaziele sind Wasserstofftechnologien unausweichlich. Das gilt vor allem für die Industrie. Daher gibt es seitens der Unternehmen zahlreiche Anstrengungen, etablierte Produktionsprozesse auf Wasserstoff umzustellen und auf eine Wasserstoffwirtschaft hinzuwirken. Im Fokus stehen die Stahl-, Kalk-, Zementherstellung sowie die grüne Chemie. Auch die Stromerzeugung zur Ergänzung volatiler, regenerativer Energien wie Sonne und Wind, rückt in den Blick. Daneben sind Wasserstofftechnologien vor allem zur Erzeugung von Hochtemperaturwärme interessant. Nicht zuletzt für die klimaneutrale Mobilität sind Antriebe auf Basis von Brennstoffzellen oder erneuerbarer Kraftstoffe relevant.

Der um Faktor zwei bis drei höhere Ertrag von regenerativen Kraftwerken an global begünstigten Standorten im Vergleich zu Deutschland kompensiert häufig den niedrigeren Wirkungsgrad durch die stoffliche Umwandlung bei Wasserstofftechnologien gegenüber durchgängig elektrischen Prozessketten. Darüber hinaus ermöglichen Wasserstofftechnologien die Energiespeicherung und somit die Verfügbarkeit von Energie unabhängig vom Ort und der Zeit der Stromerzeugung. Schließlich werden durch die stofflichen Energieträger der weltweite Energietransport und Handel möglich.

Unsere Lebenszyklusanalysen von Cradle-to-Grave zeigen, dass alle Wasserstofftechnologien die Anforderungen an Nachhaltigkeit erfüllen mit einem vergleichbaren ökologischen Fußabdruck wie durchgängig elektrifizierte Prozesse. Voraussetzung ist, dass jeweils grüne Technologien zur Erzeugung von Strom oder Kraftstoff eingesetzt werden und die Vorteile einer globalen Lieferkette genutzt werden.

Ebenso ergibt sich aus unseren techno-ökonomischen Betrachtungen eine zu durchgängig elektrischen Prozessen analoge Wirtschaftlichkeit von Wasserstofftechnologien. Hintergrund dafür ist, dass durch Wasserstofftechnologien die weltweit wirtschaftlichsten Standorte für regenerative Energien erschlossen werden können.

Fraunhofer bietet umfangreiche Analysen zu globalen Erzeugungs- und Lieferketten bzw. Technologie-, Wirtschaftlichkeits- und ökologische Studien.

Klimaneutrale Industrielle Prozesse

Der Großteil der industriellen prozessbedingten Treibhausgasemissionen entsteht in der Grundstoffindustrie. Insbesondere umfasst dies die Metallherstellung, die Herstellung mineralischer Erzeugnisse und die Erzeugung von Grundchemikalien. Die Strategie zum Erreichen einer klimaneutralen Produktion unterscheidet sich hierbei je nach Branche.

In der Stahlindustrie kann die CO₂-Entstehung bei Rohstahlproduktion durch den Einsatz von Wasserstoff in einem Direktreduktionsverfahren um bis 95 % gegenüber der heutigen Hochofenroute reduziert werden, was vom Fraunhofer IKTS im Rahmen des BMBF-Projekts MACOR in Kooperation mit den Instituten ISI und UMSICHT sowie der Salzgitter AG bereits gezeigt werden konnte.

Möglich wird dies, wenn erneuerbare Energien für die Bereitstellung des benötigten Wasserstoffs mittels Elektrolyseverfahren und die elektrische Energie für die Elektrolichtbogenöfen genutzt werden. Für die Wasserstoffbereitstellung ist hierbei das Hochtemperaturolektrolyse-Verfahren von besonderem Interesse. Demonstratoren für diese Technologie im Maßstab von 100 Kilowatt sind bereits im Einsatz. Nun soll die Überführung bis in den Gigawatt-Maßstab folgen.

Im BMBF-Folgeprojekt BeWiSe arbeiten die genannten Fraunhofer-Institute gemeinsam mit der Salzgitter AG an der Fragestellung, wie die Umsetzung der wasserstoffbasierten

Teststände zur Charakterisierung von Brennstoffzellen-Kurzstapeln für die Mobilität am Fraunhofer ISE.





Teststände zur elektrochemischen Charakterisierung von Membranelektrodenheiten für PEM-Brennstoffzellen am Fraunhofer ISE.

Rohstahlproduktion im laufenden Betrieb des Hüttenwerks gelingen kann. Hierbei werden sowohl die experimentellen Grundlagen der Eisenerzreduktion als auch die Stoff- und Energiebilanzen am Hüttenwerk sowie die Fragen der Akzeptanz des Strukturwandels am Standort ganzheitlich betrachtet.

Zur Vermeidung der Restemissionen bei der Stahlproduktion und der Emission von prozessbedingtem CO₂ bei der Kalk- und Zementherstellung sowie bei der thermischen Abfallbehandlung bieten sich Carbon Dioxid Capture and Utilisation Verfahren (CCU) an. Die Abtrennung des CO₂ erfolgt mit Verfahren, wie Aminwäsche oder keramischen Membranen. Zusammen mit „grünem“ Wasserstoff wird ein Synthesegas erzeugt, das in der chemischen Industrie zur Herstellung zentraler Basischemikalien wie Methanol genutzt werden kann. Die Umsetzung dieser Prozesskette wird u. a. im BMBF-Vorhaben Carbon2Chem@ durch Fraunhofer UMSICHT mit dem Projektpartnern demonstriert.

Im Projekt WaTTh baut das Fraunhofer IKTS basierend auf der eigenen Hochtemperatur-Co-Elektrolyse eine vollautomatisierte Demonstrationsanlage, in der aus CO₂ und Wasser flüssige Kohlenwasserstoffe und Wachse über die Fischer-Tropsch-Synthese erzeugt werden. Diese können zum Einsatz in der chemischen Industrie sowie für die Herstellung von

synthetischen Kraftstoffen wie e-Kerosin genutzt werden. Die Kapazität der Anlage liegt bei jeweils 8 l an flüssigen Produkten und Wachsen pro Tag. Mittels der entwickelten Tools zur Prozesssimulation arbeiten die Forschenden aktuell am Scale-up der Verfahren für den industriellen Maßstab.

Emissionsfreie Strom- und Wärmeerzeugung

Aufgrund der Volatilität von Sonne und Wind werden zukünftig dynamisch regelbare Kraftwerke benötigt: hier bieten sich für große Leistungen von Megawatt bis Gigawatt Wasserstoff-Gaskraftwerke an. Schon heute werden wasserstofffähige Turbinen verbaut.

Fraunhofer bietet hierzu neben Technologie- und Marktstudien, Materialentwicklungen, Tests sowie Fertigungstechnologien an.

Für niedrigere Leistungen sind Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen auf Basis von Brennstoffzellen oder auch Wasserstoff-Verbrennungsmotoren interessant, da somit hohe Gesamtwirkungsgrade für Strom und Wärme erreicht werden können. Hier kann Fraunhofer mit Hilfe von Systemsimulationen und Tests von der Material- bis zur Systemebene unterstützen.

» Brennstoffzellen-elektrische Antriebe können batterieelektrische Antriebe insbesondere im Schwerlastverkehr, in Bussen, Zügen, Schiffen oder Flugzeugen ergänzen. Unsere techno-ökonomischen sowie ökologischen Lebenszyklusanalysen belegen das große Potenzial der Wasserstofftechnologien.«



Dipl.-Ing. Ulf Groos
Abteilungsleiter Brennstoffzelle
Fraunhofer ISE

Im Bereich der industriellen Prozesswärmeversorgung kann der Einsatz von Wasserstoff eine Option speziell für höhere Temperaturanforderungen sowie für schwer direkt elektrifizierbare Prozesse darstellen. Entsprechende bottom-up Analysen zur Abwägung zwischen Elektrifizierung und Wasserstoffeinsatz für die industrielle Prozesswärme hat Fraunhofer UMSICHT für verschiedene Branchen beispielsweise in der Kurzstudie: „Dekarbonisierung der industriellen Prozesswärme im energieintensiven Mittelstand“ für den Klimahafen Gelsenkirchen durchgeführt.

Nachhaltiger Verkehr und Transport

Die zukünftige Mobilität muss ohne fossile Kraftstoffe auskommen. Wasserstofftechnologien können batterieelektrische Antriebskonzepte an vielen Stellen sinnvoll ergänzen: Brennstoffzellen liefern den Strom für elektromotorische Antriebe, erneuerbare Kraftstoffe senken die Fahrzeugemissionen bei Verbrennungsmotoren auf ein Minimum. Gemeinsam ist allen Wasserstofftechnologien, dass sie aufgrund hoher Energiedichten in den Tanks hohe Reichweiten bei gleichzeitig den heute gewohnten, kurzen Tankzeiten ermöglichen. Außerdem erfolgt die Betankung der Fahrzeuge unabhängig von Ort und Zeit der Stromerzeugung wie gewohnt an öffentlichen Tankstellen.

Die Fraunhofer-Institute bieten umfangreiche FuE-Leistungen zu Material-, Komponenten- oder Systementwicklung, zur experimentellen Charakterisierung, zu Modellierung und

Simulation, zu techno-ökonomischen Studien für Brennstoffzellen, elektromotorischen Antrieben sowie Verbrennungsmotoren, Herstellung von e-Fuels, Tankstellen und Fahrzeugen.

Fraunhofer UMSICHT entwickelt folienbasierte Komposit-Bipolarplatten für Brennstoffzellen sowie dichtungsfreie Zell- und Stack-Konzepte. In den Projekten » BiFoilStack – Entwicklung von Stack-Designs für NT-PEM-Brennstoffzellen mit neuartigen Compound-Bipolarfolien« und »H2GO – Nationaler Aktionsplan Brennstoffzellen-Produktion« erforscht Fraunhofer UMSICHT diese neue und potenziell disruptive Technologie entlang der gesamten Fertigungskette. Schwerpunktthemen sind dabei die Entwicklung von Halbzeugen und Systemkomponenten sowie neuartiger, verschweißbarer Zell- und Stack-Konzepte.



Technikum am Standort Leuna

Erprobung von Elektrolyseuren im Industriemaßstab

Das Fraunhofer IWES betreibt bzw. baut derzeit drei Hydrogen Labs, die erstmalig eine digital vernetzte Infrastruktur mit Test- und Qualifizierungskapazitäten der dazu notwendigen Elektrolyse- und Brennstoffzellensysteme von in Summe über 25 Megawatt (MW) bieten. Sie erfüllen die gleichen Grundbedürfnisse, bieten darüber hinaus jedoch spezielle Schwerpunkte. Somit entsteht ein weltweit einmaliges Angebot von Pilotanlagen entlang der gesamten Wertschöpfungskette der Wasserstoffwirtschaft.

Zertifizierung und Standardisierung

Es existieren bereits zahlreiche nationale und internationale Normungsaktivitäten (z.B. ISO 22734, VDI 4635), auch unter Beteiligung verschiedener Fraunhofer-Institute, im Bereich der Standardisierung von Wasserstofftechnologien und im Speziellen von Elektrolyseuren. Voraussetzung für den beschleunigten und nachhaltigen Aufbau von Elektrolyseurkapazitäten zur

Herstellung von (grünem) Wasserstoff ist ein breites Vertrauen der anwendungsseitigen Marktakteure (Projektierer, Investoren und Anwender) in diese Technologie und deren Zuverlässigkeit. Eine wesentliche Grundlage bilden hier allg. anerkannte, standardisierte oder normierte Prüfprotokolle und -verfahren zur Bewertung der Leistung und Haltbarkeit von Elektrolyseuren unter Bedingungen, die für aktuelle und zukünftige Anwendungen repräsentativ sind.

Entwicklung standardisierter Prüfprozesse und Validierung von Produktleistungsdaten

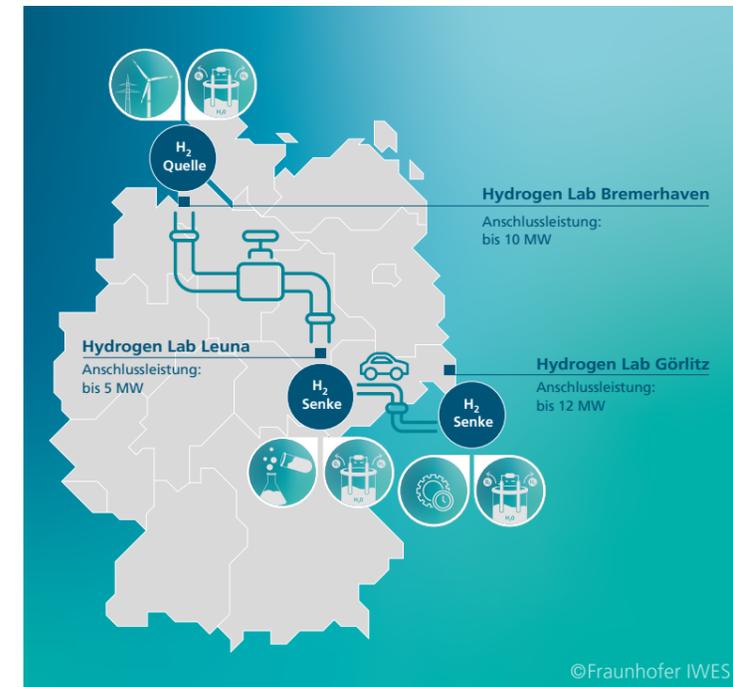
Die integrierten Systemtestumgebungen Hydrogen Lab Bremerhaven, Hydrogen Lab Leuna und Hydrogen Lab Görlitz, in welchen Leistungs- und Stresstests für Elektrolyseure unter realistischen, dynamischen Betriebsbedingungen abgebildet werden können, dienen hier zum einen der Entwicklung von solchen standardisierten Prüfprozessen aber auch der Validierung von Produktleistungsdaten auf Basis eben dieser Standards. Sinnvoll ergänzt werden Systemtests durch Test und auf Zell-, (Short-)Stack- und Subsystemebene, um Elektrolyseur-OEM und die Zulieferindustrie in gleichem Maße zu unterstützen. Das Fraunhofer IWES vereint dabei einzigartiges Know-how zur Charakteristik der Energiebereitstellung aus Windenergieanlagen (WEA) mit den Anforderungen an die großskaligen Elektrolyseure der Zukunft.

Während sich für die Standardisierung und Normierung langsam ein Weg abzeichnet, hat sich für die Systemzertifizierung auf Produktebene der Wasserstofftechnologien noch kein durchgängiger Prozess etabliert. Dem Fraunhofer IWES dienen hier die langjährigen und bewährten Erfahrungen auf dem Gebiet der Windenergieanlagentechnik als eine Art Blaupause für die Wasserstofftechnologien. Selbstverständlich referenziert eine Systemzertifizierung (z. B. für Elektrolyseure) in ihren definierten Verfahrensbeschreibungen dabei idealerweise auf vorhandene und etablierte Technologie- und Produkt- Standards und Normen.

Hydrogen Lab Leuna – Direktanschluss an die chemische Industrie

Im Hydrogen Lab Leuna (HLL) können Elektrolyseure im Industriemaßstab jeglichen Typs – PEM, AEL, AEM oder SOEC – im Dauerbetrieb 24/7 erprobt werden, wobei dynamische Lastprofile beim Betrieb mit Elektrizität aus Photovoltaik- und Windenergieanlagen simuliert werden können, um Performance, Wirtschaftlichkeit und Langzeitverhalten im Realbetrieb sowie in beschleunigten Alterungstests zu untersuchen. Diese Daten sollen die Grundlage für eine künftige Zertifizierung liefern.

Kennzeichnend für das HLL ist, dass es eines der wenigen real existierenden großen Test Facilities ist, an denen Elektrolyse-Systeme im Megawatt-Bereich über Wochen und Monate im Testbetrieb gefahren werden können. Einzigartig ist, dass der erzeugte Wasserstoff in die Wasserstoff-Pipeline des Chemieparkes Leuna eingespeist wird. Zudem



Das Hydrogen Lab Leuna ist bereits in Betrieb.

kann der erzeugte Wasserstoff in Partnerschaft mit dem Fraunhofer CBP und weiteren Forschungspartnern vor Ort für die nachhaltige Synthese von chemischen Grund- und Kraftstoffen genutzt werden. Dank der Integration des HLL in den Chemiestandort Leuna und dessen Stoffverbund können damit innovative Prozesse für die Sektorenkopplung im Pilotmaßstab direkt am Chemieindustriestandort demonstriert und unter realistischen Bedingungen erprobt werden. Das Labor wird vom Land Sachsen-Anhalt und der EU gefordert.

»Unser Beitrag zur Etablierung einer nachhaltigen Wasserstoffwirtschaft: Vertrauen und Akzeptanz durch Sicherheit und Wirtschaftlichkeit dank langer Lebensdauer und hoher Zuverlässigkeit.«

Prof. Dr.-Ing. Jan Wenske
Stv. Institutsleiter und Technischer Direktor
Fraunhofer IWES



© Fraunhofer IWES / Martina Buchholz

Hydrogen Lab Görlitz – Testinfrastruktur entlang der gesamten H₂-Wertschöpfungskette

Um ganzheitliche Lösungen für eine dekarbonisierte Wirtschaft zu entwickeln, bauen das Fraunhofer IWES und IWU gemeinsam das Hydrogen Lab Görlitz (HLG). Es wird am Freistaat Sachsen und dem Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) gefördert.

Mit dem HLG entsteht in enger Kooperation mit Siemens Energy eine Forschungs- und Entwicklungsplattform für die im Industriesektor entscheidende Power-to-H₂-to-Power-Wertschöpfungskette. Schwerpunkt der Forschungsaktivitäten ist neben der Erprobung von Wasserstoffkomponenten und der Entwicklung von großserientauglichen Fertigungstechnologien für Elektrolyseure, die Digitalisierung der Wasserstofftechnologie.

Hydrogen Lab Bremerhaven – Herausforderung Offshore-Produktion im Fokus

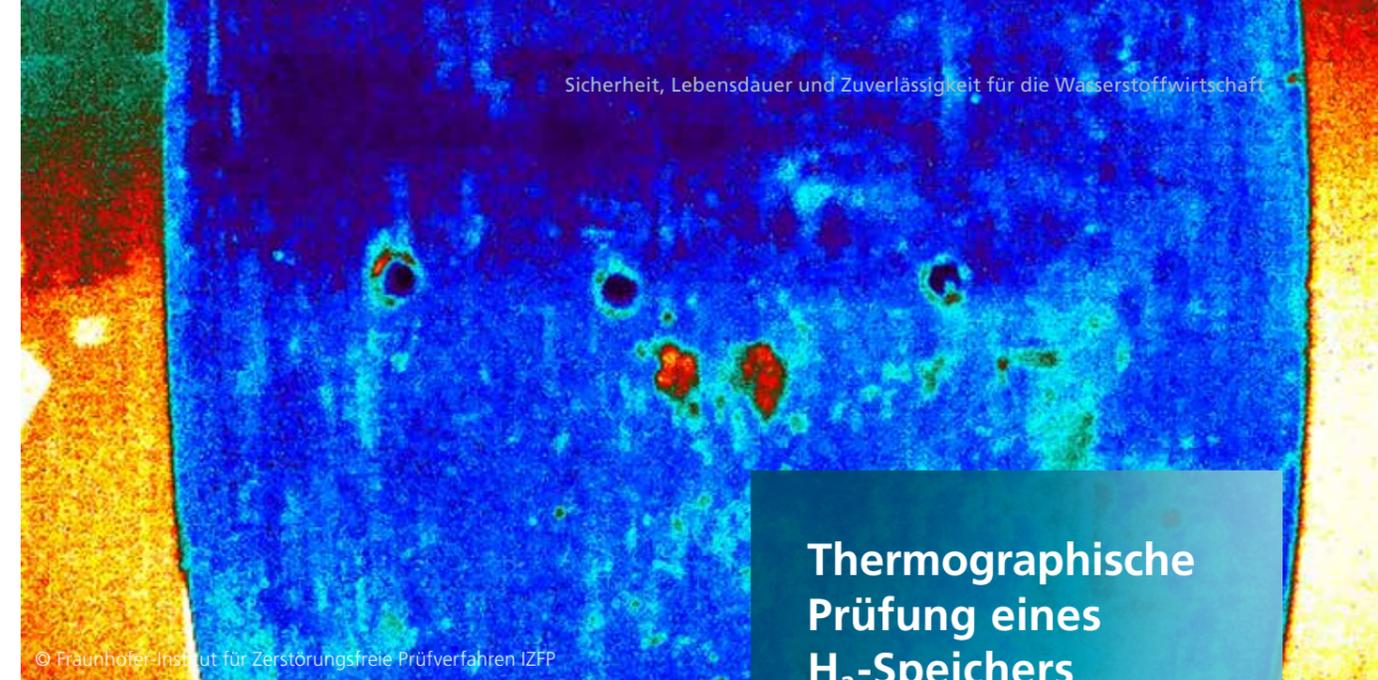
Die zunehmende Dezentralisierung der Stromerzeugung durch die Einbindung von erneuerbaren Energiequellen stellt hohe Anforderungen an die Stromnetze, die bisher auf den Parallelbetrieb von zentralisierten Großzeugern ausgelegt sind. Die Aktivitäten am Hydrogen Lab Bremerhaven (HLB) liefern Erkenntnisse darüber, wie Elektrolyseure und deren Leistungselektronik aufgebaut sein müssen, um netzstabilisierend zu wirken und so das Stromnetz der Zukunft verlässlich und flexibel zu gestalten.

Im Fokus der Forschungsaktivitäten am HLB stehen insbesondere die Interaktion zwischen Windenergieanlage und verschiedenen Elektrolyseurtechnologien im Realmaßstab, die tiefe sektorenübergreifende Integration von Elektrolyse (z. B. durch Nutzung von Nebenprodukten), als auch die Nutzung von Rückverstromungstechnologien für Inselnetz- und netzstützende Anwendungen. Das HLB, das aus Mitteln des Landes Bremen und der EU gefordert wird, soll im Jahr 2023 fertiggestellt werden und bis zu zwölf Testflächen mit einer Gesamtleistung von insgesamt bis zu 10 MW bieten.

Durch den Betrieb der drei Hydrogen Laboratories unter zentraler Regie des Fraunhofer IWES kann die Belegung der Testkapazitäten und somit die Auslastung optimal gesteuert und den Kunden überregionale passgenaue Angebote mit optimierter zeitlicher Verfügbarkeit gemacht werden. Synergien zu vorhandener Infrastruktur und bestehenden Partnerstrukturen (IMWS, IWU und IGB) werden erschlossen. Heute noch nicht verfügbare mehrjährige Betriebserfahrungen mit Elektrolyseuren können in den Hydrogen Labs in wenigen Monaten abgebildet werden. Dies erlaubt Herstellern eine genau planbare und beschleunigte Markteinführung neuer Anlagen- und Komponentendesigns. Damit bietet das Fraunhofer IWES vor allem im Megawatt-Bereich einzigartige Möglichkeiten für das Testen von Prototypen und die Weiterentwicklung von Kundenprodukten. Dies mit einem Team von hochqualifizierten Fachspezialisten, professionellem Projektmanagement und unter höchsten Sicherheitsstandards – sowohl physisch als auch mit Blick auf Intellectual Property.



Aufbau des Hydrogen Lab Bremerhaven in direkter Nachbarschaft zur 8 MW Offshore Turbine.



Thermographische Prüfung eines H₂-Speichers

© Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP

Sicherheit, Lebensdauer und Zuverlässigkeit für die Wasserstoffwirtschaft

Wasserstoff ist ein vielversprechender Energieträger, bei dessen Einsatz die Sicherheit höchste Priorität hat. Entsprechende Verfahren für die Qualifizierung der Werkstoffe und Bauteile von Wasserstoffanwendungen sind folglich unerlässlich. Zu betrachtende Einsatzgebiete reichen von der Elektrolyse, über die Speicherung bis zu Anwendungen im Mobilitäts-, Wärme/Energie- sowie Industriesektor. Eng verknüpft mit der Sicherheit ist die Frage der Lebensdauer. Die Fraunhofer-Institute bringen ihr Know-how in vielfältigen industriellen und öffentlich geförderten Projekten, die diese Aspekte adressieren, samt entsprechenden Prüfeinrichtungen ein.

Mit Sicherheit zu immer mehr Wasserstoff!

Die Transformation zu einer klimaneutralen Gesellschaft erfordert eine breite Akzeptanz der Wasserstoffwirtschaft. Dies bedeutet insbesondere ein hohes Vertrauen in deren Betriebssicherheit. Sicherheitsrisiken oder Unfallgefahren müssen weitestgehend ausgeschlossen beziehungsweise minimiert werden. Die Betreiber von Anlagen zur Erzeugung, Speicherung, Verteilung und Nutzung von Wasserstoff müssen

eine lange Lebensdauer und hohe Zuverlässigkeit der Anlagen gewährleisten. Dies kann durch angepasste Lebensdauermodelle, die Auswahl qualifizierter Werkstoffe sowie die Kontrolle und ein systematisches Monitoring relevanter Zustands- und Prozessdaten erfolgen. Der gute Ruf einer innovativen Wasserstoff-Technologie „Made in Germany“ fußt somit nicht allein auf der Technologie selbst. Viel mehr setzt er Sicherheit, Lebensdauer und Zuverlässigkeit auf höchstem Niveau voraus, um international als Benchmark zu gelten.



Durch partikuläre Sensoren wird Wasserstoff sichtbar. So können z.B. Wasserstofflecks direkt erkannt werden.

Wasserstoff, klar, aber sicher, zuverlässig und langfristig!

Neun Fraunhofer-Institute aus den Bereichen Systemanalyse, Sicherheit, Lebensdauer und Zuverlässigkeit des Fraunhofer Wasserstoff-Netzwerks widmen sich intensiv gemeinsam genau diesen Fragestellungen. Ihre Kompetenzen haben sie in einem Arbeitskreis gebündelt, um so auch gezielt Kunden ansprechen beziehungsweise die Fragestellungen beantworten zu können. So beschäftigten sich die Mitglieder im Kontext der Wasserstoff-Ökonomie mit Fragen zu wasserstoffspezifischen Lebensdauermodellen, zur Werkstoffschädigung und Schädigungsdetektion, zum Monitoring von Wasserstoff führenden Komponenten, zur Erfassung von Zustands- und Prozessdaten, sowie mit der Modellierung und Simulation von Sicherheits- oder Zuverlässigkeitsszenarien aber auch deren experimentellen Evaluation. Dabei bezieht sich der Arbeitskreis bewusst auf die Sicherheit, Auslegung und Optimierung von Anlagen, Prozessen und Komponenten wie H₂-Elektrolyseuren, Infrastrukturkomponenten, Brennstoffzellen und Speichern. Dies wird durch Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten, die sich im Ergebnis aus den Untersuchungen ableiten lassen, im Rahmen von Wasserstoff Testfeldern ergänzt.

Es werden Methoden erarbeitet, die eine effektive ganzheitliche Systembewertung und -überwachung ermöglichen und das Systemverhalten bis auf die Werkstoffebene mittels digitaler Sensorik und Sensormaterialien bewerten. Diese sichern eine hohe Verfügbarkeit von Anlagen, Prozessen und Mobilitätsanwendungen durch die rechtzeitige Detektion und Bewertung von Schädigungsvorgängen im Hinblick auf die Sicherheit und Lebensdauer, und sie ermöglichen eine rechtzeitige Instandhaltung. Wichtig sind dabei insbesondere die Sicherstellung einer hohen Anwendungsnähe sowie die Sicherheit der durch die Forschungsinstitute entwickelten Methoden und Konzepte.

Flankierend gehört zu den Arbeiten des Arbeitskreises SLZ auch die Mitarbeit in wissenschaftlichen und normativen Gremien für die Erarbeitung von Normen, Richtlinien und Umsetzungsempfehlungen im Kontext Wasserstoff.

Dieser Leitgedanke gilt für alle technischen Systeme, die für den Kunden- und Anwendernutzen einen Mehrwert erbringen sollen und dabei gleichzeitig eine hohe Lebensdauer und Zuverlässigkeit aufweisen müssen. Dabei spielen auch der Einsatz von Leichtbau sowie eine hohe Werkstoffeffizienz bei gleichzeitiger Einhaltung von Kosten für den Anwender eine wichtige Rolle.

Auch die im Rahmen der Energiewende speziell für die Wasserstoffwirtschaft entwickelten Technologien bedürfen einer Analyse in Bezug auf Verfügbarkeit, Sicherheit und Zuverlässigkeit sowie Lebensdauer. Diese umfasst neben den Elektrolysesystemen, der Brennstoffzelle bei mobilen Anwendungen die Analyse von Systemen und Komponenten der Infrastruktur, wenn etwa Wasserstoff im vormaligen Erdgasnetz verteilt wird. Aber auch die geplante Nutzung des Energieträgers in der verarbeitenden Industrie, die bisher wie beispielweise die Stahlindustrie mit diesem Reduktionsmittel keine Berührung hatten. Dabei stellen sich Entwicklern, Herstellern und Anwendern zahlreiche Fragen nach dem geeigneten Lebensdauermodell, der richtigen Werkstoffauswahl, der Systemüberwachung und Sicherheitsbewertung. Zudem besteht aber auch der Bedarf für Methoden zur Bewertung der Systemzuverlässigkeit und Resilienz.

Die Sicherheit, Funktion, Zuverlässigkeit und Lebensdauer von Komponenten und Systemen werden stets durch H₂-spezifische Werkstoffschädigungen infolge mechanischer, thermischer, chemischer und elektromagnetischer Lasten im Betrieb begrenzt, wenn die Schwachstellen nicht erkannt werden. Dem kann durch angepasste Lebensdauermodelle, die Auswahl von Werkstoffen mit hoher H₂-Korrosionsresistenz sowie einem systematischen und geplanten Monitoring begegnet werden.

Mit ein Schlüssel für den Erfolg einer Wasserstoffwirtschaft ist grundsätzlich die Sicherstellung von Sicherheit, Lebensdauer und Zuverlässigkeit. Diese drei Bausteine müssen genauso ineinander greifen wie Kostenreduktion, Rohstoffverfügbarkeit und Resilienz damit die Transformation erfolgreich gelingt.«



Prof. Dr. Karsten Pinkwart
Stellv. Produktbereichsleiter Angewandte Elektrochemie
Fraunhofer Institut für Chemische Technologie ICT,
Mitglied im Nationalen Wasserstoffrat der Bundesregierung,
Mitglied im Beirat der Wasserstoff Roadmap
Baden-Württemberg

Sicherheit durch Sichtbarkeit – Wasserstoff sichtbar machen

Wasserstoff ist bereits heute ein wichtiger Energieträger und seine Bedeutung wird in den kommenden Jahren im industriellen, aber auch in privaten Bereichen noch weiter steigen. Wasserstoff kann nicht gesehen, gerochen oder mit anderen menschlichen Sinnen direkt wahrgenommen werden. Es müssen daher Maßnahmen ergriffen werden, um Wasserstoff schnell, kostengünstig, sicher und verständlich anzeigen zu können. Nur so kann die zukünftige Nutzung von Wasserstoff in der Industrie, aber auch in Haushalten sicher gemacht werden.

Am Fraunhofer ISC wurde zusammen mit einem universitären Partner (Fußnote: Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg) ein Konzept entwickelt zum einfachen Nachweis von Wasserstoff durch einen neuartigen, partikelbasierten Pulverindikator. Einem Ampelsystem gleich kann dieser Indikator die Anwesenheit von Wasserstoff über einen zweistufigen Farbwechsel anzeigen. Die Besonderheit dieses flexiblen, pulverförmigen Indikators liegt in der Struktur der einzelnen Partikel. Es handelt sich um sogenannte Suprapartikel, die durch Sprühtrocknung hergestellt werden und aus Tausenden kleinerer Nanopartikel bestehen. In den Wasserstoff-Indikator-Suprapartikeln werden verschiedene Bausteine (Trägerpartikel, Katalysatorpartikel, Farbstoff) verwendet, die alle eine spezifische Funktion beim Nachweis von Wasserstoffgas haben. Durch die suprapartikuläre Struktur kann auf kleinstem Raum eine Mikroumgebung geschaffen werden, in der ein empfindlicher Farbstoff seine Molekülstruktur und damit seine Farbe ändern kann. Kommt der Suprapartikel

mit Wasserstoff in Kontakt, kann das Gas in sein Porensystem eindringen und an den reaktiven Oberflächen der enthaltenen Katalysatorpartikel dissoziieren. Die aktivierten Wasserstoffatome reagieren dann mit den Farbstoffmolekülen und reduzieren diese zunächst irreversibel, was sich in einem ersten Farbumschlag von violett nach pink äußert. Bei weiterer Einwirkung von Wasserstoff kann das Farbstoffmolekül weiter reduziert werden und es kommt zu einem zweiten Farbumschlag von pink nach farblos. Sobald die Wasserstoffbelastung entfernt wird, gibt das Farbstoffmolekül den gebundenen Wasserstoff wieder ab und die Rückreaktion zum pinkfarbenen Zustand erfolgt. So entsteht ein Ampelsystem, das durch einen einfachen Farbwechsel die Anwesenheit von Wasserstoff in der Umgebungsluft anzeigt.

Der große Vorteil dieses neu entwickelten suprapartikulären Pulvers ist seine große potentielle Anwendungsbreite und seine einfache und kostengünstige Herstellung im großen Maßstab. Als Bestandteil von Handschuhen oder Lecksuchsprays können defekte Dichtungen in Rohrleitungen erkannt werden. Eingearbeitet in die Beschichtung von z.B. Wasserstofftankstellen, Autos oder Heizungsanlagen kann der Farbwechsel schnell und einfach auf eine Gefahr aufmerksam machen. Zum Auslesen der Ergebnisse ist weder eine elektronische Einheit noch Fachpersonal notwendig, da der Farbumschlag mit bloßem Auge von jedem erkannt werden kann.



Digitale Plattformen schaffen Vernetzung

Die digitale Welt des Wasserstoffs

Wasserstoff gilt als vielversprechender Energieträger, der großen Einfluss auf die erfolgreiche Umstellung auf eine klimafreundliche Energieversorgung nehmen kann, indem er zur Dekarbonisierung von Industrie und dem Verkehrssektor beiträgt. Dabei spielen digitale Lösungen eine entscheidende Rolle, um die Produktion, Verteilung und Nutzung von Wasserstoff effizienter, sicherer und kosteneffektiver zu gestalten. Digitale Lösungen können die Integration von erneuerbaren Energiequellen in die Wasserstoffproduktion erleichtern und eine bessere Vernetzung von Produktion und Verbrauch ermöglichen. In diesem Zusammenhang gewinnen digitale Lösungen in der Wasserstoffproduktion immer mehr an Bedeutung und werden in Zukunft eine wichtige Rolle in der Energiewende spielen. Darüber hinaus sind digitale Angebote ein wichtiger Wachstumsmotor und können den Weg für neue Geschäftsmodelle ebnen. Seit dem Jahr 2021 arbeiten das Fraunhofer IMW gemeinsam mit verschiedenen Forschungspartnern daran, den Markthochlauf im Bereich Wasserstoff in Deutschland digital zu begleiten. Dabei werden die Hürden und Herausforderungen für den digitalen H₂-Hochlauf untersucht und notwendige Maßnahmen diskutiert.

Discovery Day und Workshop

Die Discovery Days richten sich an Unternehmen, die sich intensiv mit der Rolle von digitalen Technologien bei der Etablierung einer nachhaltigen Wasserstoffwirtschaft beschäftigen (möchten). Im Rahmen der Workshops werden verschiedene Aspekte behandelt, darunter die Digitalisierung von Wasserstoffproduktionsanlagen, die Integration von Wasserstoff in bestehende Energieinfrastrukturen, die Rolle von digitalen Technologien bei der Optimierung von Wasserstoffnetzwerken und die Entwicklung von digitalen Geschäftsmodellen im Wasserstoffbereich.

Ziel der Discovery Days ist es, ein Verständnis für die Bedeutung von digitalen Lösungen bei der Umsetzung einer nachhaltigen Wasserstoffwirtschaft zu vermitteln und diese in einer individuellen Wasserstoffstrategie mit ersten Umsetzungsideen zu verankern. Bisher wurden in verschiedenen Formaten bereits drei solcher Discovery Days durchgeführt.

HyTrust – Datenaustausch in der Wasserstoffwirtschaft

Im Forschungsprojekt HyTrust steht die Frage des Datenaustauschs in der aufstrebenden Wasserstoffwirtschaft im Fokus. Diese Branche spielt eine entscheidende Rolle bei der Bewältigung gesellschaftlich relevanter Probleme wie der Energiewende. Die Entwicklung digitaler Lösungen und die Förderung von Innovation und Wettbewerb hängen stark von der

Möglichkeit ab, Daten effektiv zu teilen. Trotz der zunehmenden Verfügbarkeit von Daten wird der organisationsübergreifende Datenaustausch bisher nur zögerlich umgesetzt. Dies ist auf verschiedene Hemmnisse zurückzuführen, darunter mangelndes Vertrauen, die Angst vor Know-how-Verlust und Wettbewerbsnachteilen sowie das Fehlen eines sicheren organisatorischen Rahmens und klarer Geschäftsmodelle.

In diesem Kontext erweisen sich Datentreuhandmodelle (DTM) als vielversprechende Ansätze, um den organisationsübergreifenden Datenaustausch zu fördern und Daten wirtschaftlich zu nutzen. Ein entscheidendes Ziel dabei ist die Stärkung der individuellen Kontrolle über den Datenverkehr. Dennoch sind mit der Einführung von Datentreuhandmodellen zahlreiche Fragen verbunden, die in verschiedenen Themenfeldern untersucht werden müssen.

Das Projekt HyTrust, das vom Fraunhofer IEE in Kassel und dem Fraunhofer IMW in Leipzig durchgeführt wird, zielt darauf ab, die Implementierung von Datentreuhand-Systemen in der aufstrebenden Wasserstoffwirtschaft für unterschiedliche Anwendungskontexte zu erforschen. Das Projekt konzentriert sich auf zwei Use Cases, den Wasserstoff-Industriepark und die Wasserstoffnetze bzw. Kapazitätsvermarktung

Das Projekt HyTrust ist somit ein wichtiger Schritt, um die Herausforderungen im Datenaustausch und die wirtschaftliche Nutzung von Daten in der Wasserstoffwirtschaft anzugehen und einen Beitrag zur erfolgreichen Umsetzung der Energiewende zu leisten.

Die doppelte Transformation aus Dekarbonisierung und Digitalisierung bedeutet, dass wir für den Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft nicht nur die physische Infrastruktur, sondern auch die digitale Welt des Wasserstoffs ausbauen müssen.«



Prof. Dr. Heiko Gebauer

Senior Expert, Gruppe Daten- und Plattformbasierte Wertschöpfung
Fraunhofer-Zentrum für Internationales Management und Wissensökonomie IMW

© Fraunhofer IMW

Cluster of Excellence „Integrierte Energiesysteme“ (CINES)

Der Bereich »Energiesystemanalyse« des Fraunhofer Cluster of Excellence Integriertes Energiesystem CINES wird vom Fraunhofer ISI koordiniert. CINES adressiert die zentralen technologischen und ökonomischen Herausforderungen der System- und Marktintegration hoher Anteile variabler erneuerbarer Energien in das Energiesystem und betrachtet dabei – als ein zentrales Element der Transformation – die Wasserstoffherzeugung durch Elektrolyse. Leistungen richten sich primär an Policy Maker und Entscheidungsträger:innen auf nationaler und EU-Ebene, aber auch an Akteure der Energiewirtschaft (ÜNBs, EVUs, BNetzA, etc.) und umfassen:

- Modellierung der Gesamtenergiesysteme in hoher Auflösung.
- Entwicklung von Visualisierungstools für den Stand der deutschen Energiewende und Visualisierung der Transformation des deutschen Energiesystems.
- Pfadanalyse zur Klimaneutralität. Dabei beschäftigen wir uns mit den Fragestellungen zur Integration von Erneuerbaren Energien und der Rolle von Wasserstoff im zukünftigen Energiesystem.
- Aufbau umfassender Datenbank zum deutschen und europäischen Energiesystem.
- Kompetenzbündelung verschiedener Fraunhofer Institute und kombinierte Nutzung verschiedener Modelle

Langfristszenarien

Im Projekt „Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland“ (Langfristszenarien 3) werden im Auftrag des Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz Szenarien für die zukünftige Entwicklung des Energiesystems modelliert, mit denen die energie- und klimapolitischen Ziele erreicht werden. Die Modellierung umfasst das gesamte Energiesystem, also übergreifend die Erzeugung von Strom, Wärme und Wasserstoff sowie die Nachfrage nach Energie in den Sektoren Industrie, Verkehr, Gebäude und Geräte. Die Energieinfrastrukturen (Strom und Gase) werden ebenfalls mit modelliert. Im Fokus der Analyse steht dabei nicht die Entwicklung eines einzelnen »Leitszenarios«, sondern die Untersuchung von unterschiedlichen Szenariowelten um durch die vergleichenden Analysen Erkenntnisse über die Vor- und Nachteile alternativer Pfade für die Transformation des Energiesystems zu gewinnen. Das Projekt stellt detaillierte Ergebnisse, Datensätze und Inhalte in Form eines Szenario-Explorers und einer Vielzahl an themenspezifischen Webinaren für Wissenschaft, Industrie und Politik zur Verfügung.

HYPAT – Globaler H2-Potentialatlas

Das Projekt HYPAT entwickelt einen globalen Wasserstoff-Potentialatlas und identifiziert dafür erstmals umfassend mögliche Partnerländer Deutschlands für eine kooperative Entwicklung einer zukünftigen grünen Wasserstoffwirtschaft inklusive der Bedeutung der Produktionsregionen für eine gesicherte, ökonomische und ökologisch nachhaltige Versorgung. Dem Vorhaben liegen die Zielsetzungen der deutschen nationalen

Wasserstoffstrategie (NWS), dem internationalen Übereinkommen zum Klimaschutz und den Sustainable Development Goals (SDG) zu Grunde. Neben der detaillierten Erhebung der weltweiten techno-ökonomischen Potenziale und Analyse der Wasserstoffketten, schließt die Analyse die symmetrischen Bedürfnisse der Partnerländer ein. Letztere umfassen die nachhaltige Deckung der eigenen Energienachfrage, das Erreichen eigener Klimaziele und das Einhalten spezifischer Nachhaltigkeitskriterien für die Wasserstoffwirtschaft in den Partnerländern. Weiterhin werden die Fähigkeiten der Länder, solche kapital- und technologieintensiven Anlagen zu errichten, analysiert. Ebenso werden die sich für diese Länder ergebenden Chancen erhoben sowie Akzeptanz- und Stakeholderanalysen durchgeführt. Dem sich hieraus ergebenden Angebot an Wasserstoff- und Syntheseprodukten wird dann die weltweite Nachfrage der Importländer gegenübergestellt. Dabei wird Wert daraufgelegt zu analysieren, wie sich künftig Wasserstoffmärkte etablieren und welche Marktpreise von Wasserstoff künftig erwartet werden können. Auf dieser Basis werden schließlich Politikempfehlungen für die Entwicklung einer nachhaltigen Importstrategie für Deutschland abgegeben.

TransHyDE-Sys

Das Leitprojekt TransHyDE ist eines von drei Wasserstoff-Leitprojekten des BMBF und beschäftigt sich mit der Entwicklung einer Wasserstoff-Transport-Infrastruktur. Dazu sollen mehrere Technologien zur Wasserstoff-Infrastruktur entwickelt, bewertet und demonstriert werden. Um die Herausforderungen und Hürden beim Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft aus dem Weg zu räumen, setzt das Leitprojekt TransHyDE sowohl auf Demonstrationsprojekte als auch auf Forschungsverbünde. Im Forschungsverbund TransHyDE-Sys - »Systemanalyse zu Transportlösungen für grünen Wasserstoff« nimmt die Systemanalyse als Querschnittsprojekt eine spezielle Funktion wahr: Einerseits wird mit Hilfe von eigenen Modellierungs- und Simulationsarbeiten sowie ökologische Analysen wesentliches Systemwissen für den zeitabhängigen Aufbau und die Kopplung der Energieinfrastrukturen generiert. Andererseits sollen Beobachtungen, Analysen und Anforderungen der Umsetzungs- und Forschungsprojekte aufgenommen sowie mit existierendem Wissen abgeglichen und übergreifend eingeordnet werden. Die Ergebnisse sollen in eine sich kontinuierlich entwickelnde Roadmap einfließen. Diese unterstützt fortlaufend die Forschungs- und Umsetzungsprojekte, identifiziert mögliche Forschungs- und Entwicklungsthemen für die nächsten Projektphasen und liefert auch wichtige Handlungsempfehlungen für externe Stakeholder.

Modellbildung und Simulation von Brennstoffzellensystemen in hybriden Anwendungen

In aktuellen Entwicklungsprozessen spielen vermehrt simulative Betrachtungen eine zentrale Rolle um Entwicklungszyklen zu verkürzen und aufwendige Zwischenschritte in kostenintensiven Prototypen zu vermeiden. Besonders im Schwerpunkt Brennstoffzellensysteme und deren Integration in Fahrzeuge sind weitreichende Kompetenzen an den Fraunhofer-Standorten vorhanden.

Einen Schwerpunkt der Arbeiten am Fraunhofer IVI bildet die Modellierung von Brennstoffzellensystemen im Kontext der Erstellung von effizienten und verschleißarmen Betriebsstrategien im Fahrzeugkontext. Dabei kommen eigene Modelle von Brennstoffzellen und Batteriesystemen zum Einsatz, die sowohl die Leistungs- als auch die Verschleißcharakteristik beinhalten. Zur Erstellung der Simulationsmodelle werden Prüfstände zur Zell- und Systemcharakterisierung genutzt. Die entwickelten Betriebsstrategien für die Verwendung in hybriden Antriebssträngen mit Batterie und Brennstoffzelle sind selbstlernend und prädiktiv und optimieren Komponentenlebensdauer und Systemeffizienz.

Der Schwerpunkt der Simulation und Modellierung liegt hier in der Feststellung und Ausnutzung von Komponenteneigenschaften in verschiedenen Nutzungsszenarien für Nutzfahrzeuge, Schienenfahrzeuge sowie Landmaschinen und Sonderfahrzeuge. Besonderes Augenmerk wird daraufgelegt, dass die entwickelten Betriebsstrategien echtzeitfähig auf Fahrzeugsteuergeräten ausgeführt werden können und somit der Schritt von der Simulation in die Realität möglichst unkompliziert vollzogen werden kann. Mit diesen integrativen Simulationsaufgaben werden direkte Interessen von Fahrzeugentwicklern für die Fahrzeugdimensionierung und -Konzeption bedient.

Fraunhofer geht aber auch weiter ins Detail. So wird am Fraunhofer ISE Brennstoffzellensystementwicklung und -Simulation auf Zell- und Stackebene durchgeführt. Dies dient dem Verständnis der physikalisch-chemischen Effekte auf Mikro- und Makroebene, um das Leistungs- und Alterungsverhalten im Zusammenspiel mit Komponentendesign, Materialauswahl und Betriebsführung zu beschreiben. Dazu kommen analytische und numerische Modelle von 0-D bis 3-D zum Einsatz sowie Methoden des maschinellen Lernens - letztere insbesondere um die Auswirkung verschiedener Produktionsprozesse zu analysieren.



Referenzfabrik.H2

Produktion von Wasserstoff-Systemen: Elektrolyseur und Brennstoffzelle

Wasserstofftechnologien spielen eine zentrale Rolle, um die deutschen und europäischen Klimaziele zu erreichen. Schlüsselemente sind dabei Systeme zur Wandlung erneuerbarer Energien zu Wasserstoff (Elektrolyseur) bzw. dessen Rückverstromung (Brennstoffzelle). Noch fehlen jedoch die für die wirtschaftliche Produktion dieser Kernelemente erforderlichen Technologien. Hier setzt die Referenzfabrik.H₂ mit den vom BMBF bzw. BMDV geförderten Leitprojekten H2Giga/ FRHY (Elektrolyseur) und H2GO (Brennstoffzelle) an.



FRHY – Stack
Referenz für hochratenfähige Elektrolyseurproduktion



Denn mit der Produktion von wesentlichen Wasserstoffsystemen wie Elektrolyseuren und Brennstoffzellen entsteht in naher Zukunft ein attraktives Geschäftsfeld für eine Vielzahl von Unternehmen unterschiedlicher Branchen und Größe. In der Referenzfabrik.H₂ bündeln Fraunhofer-Institute alle wesentlichen Kompetenzen, um Unternehmen eine technologische und wirtschaftliche Perspektive für industrialisierbare Lösungen aufzuzeigen.

H2Giga Verbundprojekt: FRHY – Referenzfabrik für hochratenfähige Elektrolyseur-Produktion

FRHY wird im Rahmen des Wasserstoffleitprojektes H2Giga vom BMBF gefördert. Neben dem koordinierenden Fraunhofer IWU Chemnitz sind die Fraunhofer-Institute: IPT Aachen, IPA Stuttgart, ENAS Chemnitz, IMWS Halle/ S. und das IWES Bremerhaven beteiligt.

FRHY ist als flexible, multidirektionale, technologieoffene Lösung für die Großserienfertigung von Elektrolyseuren konzipiert. In dessen Rahmen werden neuartige Produktions- und Prüfmodule entwickelt. Parallel werden die entsprechenden digitalen Abbilder geschaffen und in einer zentralen virtuellen Architektur verknüpft. Dadurch entstehen nicht nur neue Produktionslösungen, sondern auch ein Technologiebaukasten, der weitreichende Betrachtungen erlaubt. So können einzelne Verfahren hinsichtlich

Fertigungsqualitäten, Skalierbarkeit und Kosten verglichen werden. In der Referenzarchitektur den Prozessschritten zugeordnet, lassen sich daraus Produktionsvarianten bis hin zu gesamten Wertschöpfungsketten berechnen. Damit ist es möglich, Strategien zu Parallelisierung, Automatisierung und Fertigungstiefe einander gegenüberzustellen und zu bewerten. Folglich können nicht nur Investitionskosten, sondern auch Return-on-Investment-Aussagen in Abhängigkeit der geplanten Produktionsmenge validiert dargestellt werden. Dieses ist die kontinuierliche Basis für eine hochratenfähige, reproduzierbare Produktion zur stetigen Weiterentwicklung und Erhöhung der Elektrolyseurqualität und Verbesserung der Lebensdauer, die zudem dynamisch und flexibel an sich verändernde Voraussetzungen angepasst werden kann.

Wasserstoff bietet die einmalige Möglichkeit, Klimaschutz und Energiewende mit Wertschöpfung zu verbinden, wenn es gelingt, neue hochratenfähige Technologien zu entwickeln und diese schnell in die Industrie zu transferieren.«



Dr.-Ing. Ulrike Beyer
Leiterin Referenzfabrik.H2



H2GO: Forschungsschwerpunkte

H2GO – Nationaler Aktionsplan Brennstoffzellen-Produktion

Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge (FCEV) ermöglichen gute Chancen für ein zukünftig marktrelevantes Antriebssystem im Fernverkehr. In technologischer Hinsicht bietet die Brennstoffzelle im Vergleich zu den heutigen fossilen Antriebstechnologien ähnliche Volumen- und Gewichtszuladungen bei gleichen Reichweiten und Tankzeiten. Damit bleibt den Speditionen die heute gewohnte Flexibilität im Lkw-Einsatz erhalten. Gegenüber anderen emissionsfreien Antrieben sind FCEVs gerade im Schwerlastverkehr betriebs- wie volkswirtschaftlich und auch ökologisch wettbewerbsfähig – einen erfolgreichen Markthochlauf vorausgesetzt. Über importierten Wasserstoff kann die Belastung des heimischen Strommarktes, die sich durch die Produktion von größeren Mengen an Wasserstoff aus erneuerbaren Energien ergeben würde, verringert werden.

Der vom BMDV geförderte Nationale Aktionsplan Brennstoffzellen-Produktion H2GO unterstützt den Aufbau der deutschen Brennstoffzellen-Industrie über produktionstechnische Forschung, Entwicklung und industrielle Umsetzung. Dadurch soll nachhaltig eine nationale Technologie-Souveränität gewährleistet und gleichzeitig die Exportfähigkeit der deutschen Lkw-Hersteller bzw. des notwendigen Maschinen- und Anlagenbaus forciert werden.

Das Fundament bilden 19 Fraunhofer-Institute in insgesamt 9 Bundesländern, die mit ihren Forschungskompetenzen und -infrastrukturen sowie lokalen Netzwerken neue Fertigungslösungen in regionalen Technologiehubs entwickeln. Diese werden in die vier Technologie-Verbünde für Protonenaustausch-Membran (R2MEA), Bipolar-Platte (R2HP, HP2BPP) sowie industrielle Demontage und eine Überführung in Recycling und Reuse (ST2P) integriert und unter Einbeziehung aktuell entstehender Länder- und Bundesinitiativen gezielt gestärkt.

Der übergeordnete NEXUS-Verbund: ViR ermöglicht auf Basis der digitalen Abbilder der entwickelten Produktionslösungen, den synergetischen Zusammenschluss in einer virtuellen Referenzarchitektur für Brennstoffzellen-Produktion.

Adressat der Lösungen des Nationalen Aktionsplans sind Unternehmen verschiedener Größe, die die Wertschöpfungskette der Brennstoffzellen-Produktion darstellen und bis zur Systemumgebung der mobilen Anwendung schließen bzw. der dafür erforderliche Maschinen- und Anlagenbau.

Die höchstratenfähige Prozesskette gibt, aufgrund ihres hohen Evolutionsgrades neuen, bislang nicht beteiligten, Branchen die Möglichkeit, ihr Geschäftsfeld durch die Brennstoffzellen-Produktion zu erweitern. So partizipieren nicht nur die Komponentenhersteller und Systemintegratoren von den innovativen Produktionslösungen des Nationalen Aktionsplans, sondern insbesondere der Maschinen- und Anlagenbau. Auch weiteren Unternehmen mit spezifischen Verfahrenen und darüber hinaus der Werkzeugbau, Materiallieferanten, Engineering, Mess- und Regelungstechnik bieten die H2GO-Entwicklungen neue wirtschaftliche Perspektiven.

Dabei wird ein neutraler und von konkreten Unternehmen unabhängiger Ansatz verfolgt. Insbesondere erlaubt das Konzept des Aktionsplans, innovative Produktionskonzepte für die Zukunft zu verfolgen, die vorwettbewerblich sind und über die derzeit verfügbaren Technologien weit hinausgehen.

Der Aktionsplans bietet einen umfassenden Wissens- und Technologietransfer und ermöglicht es zudem, die geschaffene Infrastruktur verschiedenen Industriepartnern zur direkten Kooperation, Bemusterung, Pilotfertigung bzw. Ausgründung zur Verfügung zu stellen und sowohl Produktionsprozesse als auch die Brennstoffzelle als Produkt weiterzuentwickeln. Dadurch werden nicht nur einzelne Konsortien subventioniert, sondern das gesamte Ökosystem der Wertschöpfung gepusht.

Referenzfabrik.H2 – Wertschöpfungsgemeinschaft Wasserstoffsystemproduktion

H2GO und FRHY bilden die technologischen Stützstellen der Referenzfabrik.H2. Diese hat sich das Ziel gesetzt, Schrittmacher für die industrielle Massenproduktion von Elektrolyseuren und Brennstoffzellen zu sein. Industrie und Wissenschaft verstehen sich dabei als eine Wertschöpfungsgemeinschaft, die gemeinsam am zügigen Hochlauf einer effizienten, stückzahlskalierbaren Produktion dieser Wasserstoffsysteme arbeitet. In der Referenzfabrik.H2 bringen Industrieunternehmen ihre Kernkompetenzen in die Wertschöpfungskette ein und entwickeln diese gemeinsam mit anderen Industrieunternehmen weiter. So kann es gelingen, im Schulterschluss mit der Wissenschaft schneller voranzukommen und kostengünstige Systeme für den Masseneinsatz zu produzieren.

Die Referenzfabrik.H2 umfasst den Technologie-Baukasten -Services und -Mall.

Die Herstellung der Wasserstoffsysteme Elektrolyseur und Brennstoffzelle ist technologisch sehr vielfältig. Neben den verschiedenen Methoden: Alkalisches, Elektron- und Protonenaustausch sowie Hochtemperatur, die fertigungstechnisch berücksichtigt werden müssen, stellen Geometrie, Lebensdauer, Herstellungsmengen sowie -kosten weitere Rahmenbedingungen für die Auswahl von Verfahren und die Notwendigkeit von Prozessschritten dar.

Der Technologie-Baukasten beinhaltet verschiedenartige produktionstechnische Bausteine an Verfahrensvarianten, Maschinen und Anlagen, die zur Herstellung von Wasserstoffsystemen notwendig sind. Er ist für unterschiedliche Wasserstoffsystem-Komponenten entwickelt und umfasst mehrere Ebenen, die jeweils die einzelnen Fertigungs- bzw. Prüfschritte darstellen. Hier sind mögliche Verfahrensvarianten und die untersuchten Parameter angeordnet. Ziel ist es, somit einen Vergleich von Verfahrensvarianten zu ermöglichen. Dabei werden technologische, wirtschaftliche und Nachhaltigkeitsaspekte berücksichtigt. Auch kann eine Verfahrensvariante pro Ebene bzw. Produktionsschritt ausgewählt werden und dann zu einer Teilprozesskette kombiniert werden. Diese können wiederum Komponenten übergreifend zu Wertschöpfungsnetzen verbunden werden.

Die technologische Basis wird von den beteiligten Fraunhofer-Instituten generiert. Dabei werden Ergebnisse aus vorwettbewerblichen Fraunhofer-Projekten und geförderten Forschungsvorhaben transparent zum Wissens- und Technologietransfer zu Verfügung gestellt.

Die Technologie-Services wurden speziell für Unternehmen geschaffen, die daran interessiert sind, ihre Kompetenzen und Infrastrukturen in eine Wasserstoffsystem-Produktion zu integrieren. Dabei werden die Handlungsbereiche Orientierung, Auslegung, Entwicklung, Automatisierung, Industrialisierung, Digitalisierung, Qualitätssicherung und Labeling adressiert.

Um den Technologie- und Wissenstransfer zu unterstützen, wurde die Technologie-Mall entwickelt. Hier sind die wesentlichen Stack-Komponenten aufgeführt und hinsichtlich der für deren Produktion notwendigen Module unterteilt. Pro Produktionsmodul sind die möglichen Verfahren genannt und mit der in der Wertschöpfungsgemeinschaft verfügbaren Anlagentechnik beschrieben. Einzelne Verfahren können unter spezifischen Zielkorridoren (z.B. hohe Fertigungsmengen, hohe Qualität) zu Prozessketten zusammengeführt werden. Komponenten übergreifend wird die Prozessketten-Darstellung anhand der System-Entwicklungen realisiert. In ähnlicher Art und Weise werden die Service-Module dargestellt und unterteilt.



Physischer Technologie-Baukasten
Fraunhofer IWU



Technologie-Mall, Fraunhofer IWU

Vom Material zum System: Werkstoffe als Innovationstreiber

Grüner Wasserstoff wird als Energieträger und chemischer Rohstoff einen entscheidenden Beitrag dazu leisten, die Klimaziele zu erreichen. Dies kann jedoch nur gelingen, wenn die Systeme zu Erzeugung, Speicherung, Transport und Nutzung von H₂ optimiert, also energieeffizienter, robuster, sicherer und wirtschaftlicher werden. Fraunhofer leistet mit seinen Kompetenzen einen entscheidenden Beitrag dazu.

Robuste Brennstoffzellen- und Elektrolyse-Stacks

Zur Erzeugung von grünem Wasserstoff wird Wasser mit Hilfe von elektrischem Strom in H₂ und O₂ zerlegt. Jede Art der Elektrolyse bringt spezifische Vorteile mit sich, sodass die Wahl der geeigneten Technologie je nach Einsatzszenario unterschiedlich ausfallen kann. Fraunhofer-Forschende verfügen bei allen Elektrolysearten über große Kompetenz und können viel dazu beitragen, die Elektrolyse weiter voranzubringen. Während die wässrige alkalische Elektrolyse (AEL) und zu weiten Teilen auch die saure Membran-Elektrolyse – PEM-Elektrolyse genannt – technisch recht ausgereift sind, sind bei der alkalischen Membran-Elektrolyse und der Hochtemperatur-Elektrolyse noch technologische Fragen zu klären.

Die robusten Elektrolyseure für AEL kamen bisher in Kraftwerken und Chemieanlagen mit stationärer Belastung zum Einsatz, in denen die Last stets gleich blieb. Nun steht jedoch

ein Paradigmenwechsel an: Durch die regenerativen Energien entstehen starke Lastschwankungen, die neue Konzepte erfordern. Fragen rund um diese Dynamik untersucht das Fraunhofer IFAM im Technikumsmaßstab: in einer Anlage mit einer Leistung von 30 Kilowatt. Partnern bietet das Institut Dienstleistungen für die Analyse des Realverhaltens von AEL-Elektrolyseuren an. Darüber hinaus optimieren das Fraunhofer IFAM und Fraunhofer IMWS die Langzeitstabilität der Elektroden. Für die alkalischen Elektrolyseure der nächsten Generation, die bei erhöhten Temperaturen und hohen Drücken arbeiten, forscht das Fraunhofer IKTS in den Projekten AWEC++ und HHoch 2 mit Förderung der TAB und des BMWK an neuen Materialien und Stacksystemen. Damit wird eine Steigerung der Leistungsdichte sowie ein stabiler Betrieb möglich.

Jünger als die AEL ist die PEM-Elektrolyse. Während erstere einen Technologiereifegrad von acht bis neun hat, liegt jener der PEM-Elektrolyse bei sieben bis acht. Auch sie bietet diverse

Die elektrolysegestützte Direktreduktion von Eisenerzen mit regenerativ erzeugtem Wasserstoff kann in Zukunft der zentrale Prozessschritt einer umweltfreundlichen Stahlproduktion sein. CO₂-Emissionen können damit um bis zu 95 Prozent gemindert werden. Insbesondere die auf keramischen Technologien basierende Hochtemperatur-Elektrolyse bietet ein hohes Anwendungspotenzial – neben Strom kann Abwärme als Energiequelle genutzt werden, was insgesamt zu einer erheblichen Effizienzsteigerung führt.«



Prof. Dr. Alexander Michaelis
Institutleiter
Fraunhofer IKTS



Assemblierung langzeitstabiler Hochtemperatur-Elektrolyseure

Vorteile: So können die verwendeten Stromdichten sehr hoch sein, die Bauweise sehr kompakt – und das Verfahren ist dynamisch betreibbar. Aufgrund des sauren Mediums müssen die Materialien jedoch sehr robust sein. Forschende des Fraunhofer ISE entwickeln neue Membranmaterialien, verlängern die Haltbarkeit der Zellen durch eine Anti-Korrosions-Beschichtung, führen Lebensdauertests durch und wollen das Verfahren in größerem Maßstab überführen. All diese Maßnahmen können dazu beitragen, die Kosten zu senken. Sowohl das Fraunhofer IKTS, als auch das IFAM und IST beschäftigen sich zudem im BMWK Projekt H2GO mit dem Recycling von PEM Stacks und deren elektrochemischer Charakterisierung.

Die Hochtemperatur-Elektrolyse findet bei über 800 °C statt. Wo Abwärme zur Verfügung steht, kann sie ihre Stärken entfalten: Um ihre Reaktionen zu katalysieren, sind keine Edelmetalle nötig; überdies lassen sich die gleichen Systeme sowohl im Elektrolyse- als auch im Brennstoffzellenmodus nutzen. Schließlich ermöglicht sie die Co-Elektrolyse, bei der Wasser in H₂ und O₂ sowie CO₂ in Sauerstoff und Kohlenmonoxid (CO) aufgespalten werden. Das CO bildet zusammen mit H₂ das »Synthesegas«, Grundlage zur Herstellung zahlreicher Chemieprodukte. Das Fraunhofer IKTS widmet sich der Langzeitstabilität der Elektrolyseure ebenso wie dem Wirkungsgrad und den Kosten.

Die IKTS-Teams optimieren Materialien, fertigen Zellen und bauen diese zu Stacks zusammen. In Materialtests untersuchen sie im Rahmen der BMBF-Projekte EIKoHEL und

SOC Degradation 2.0 die Degradationsmechanismen in Stack-Komponenten, u. a. in Abhängigkeit unterschiedlicher Kontaminanten und Konzentrationen. So lassen sich zuverlässige Energiesysteme realisieren, beispielsweise zur Kopplung von Hochtemperatur-Elektrolyse und Fischer-Tropsch-Synthese. In der weltweit einzigartigen Recycling-Anlage in Thallwitz können damit biologische Abfälle wieder in nutzbare Stoffe wie synthetische Kraftstoffe und Biowachse gewandelt werden (siehe Kapitel »Klimaneutrale industrielle Prozesse«, Seite 7). Für die Kraft-Wärme-(Kälte-)Kopplung mit Wasserstoff – etwa für die netzferne Versorgung – arbeitete das Fraunhofer IKTS an planaren Zellen und Stacks und entwickelte die Technologie mit der Dresdner Firma Sunfire bis zur Marktreife.

Ein reibungsloser Betrieb der Brennstoff- und Elektrolysezellen erfordert, dass die Gasatmosphären dicht voneinander getrennt werden. Hierzu werden Lote benötigt, die bis ca. 850 °C stabil eingesetzt werden können. Das Fraunhofer ISC hat hier im Rahmen diverser Industriepartnerschaften kristallisierende Glaslote entwickelt, die allen thermischen, chemischen und mechanischen Anforderungen genügen. Diese können sogar in einem vollautomatisierten Herstellungsprozess verwendet werden. Daran, dass der Stack auch im Betrieb dicht bleibt, arbeitet das Fraunhofer IWU mit der TU Chemnitz und Industriepartnern: Smarte Dichtungen erkennen, wenn sich die Vorspannung des Stacks während des Betriebs ändert. Mithilfe von Formgedächtnislegierungen wird dann die optimale Vorspannkraft wiederhergestellt.



Werthaltige Produkte,
gewonnen über Hoch-
temperatur-Elektrolyse und
Fischer-Tropsch-Synthese;
Fraunhofer IKTS

Systeme zum Reforming

Derzeit entsteht Wasserstoff meist nicht aus Wasserelektrolyse, sondern durch Reformierung, basierend auf organischen Verbindungen – im einfachsten Fall Methan oder Methanol. Auch diese Art der H₂- bzw. Synthesegasherstellung kann in einer nachhaltigen Industrie eine Funktion erfüllen, wenn etwa die organischen Verbindungen aus Biomasse stammen und wenn das entstehende CO₂ dem globalen Kreislauf entzogen wird. Mehrere Fraunhofer-Institute arbeiten an der Optimierung der zugrunde liegenden Reformersysteme: Das Fraunhofer IMM entwickelt Komplettlösungen für Brennstoffaufbereitung und -synthese vom Labor- über den Pilotmaßstab bis zur Serienreife.

Das Fraunhofer IKTS widmet sich dem in einem Brennstoffzellensystem erforderlichen Nachbrenner, vielmehr seinem Herzstück, der Schaumkeramik. Für eine lange Lebensdauer muss diese äußerst hochtemperatur- und thermoschockbeständig sein. Offenzellige Schaumkeramiken aus Siliciumcarbid sind hierfür besonders geeignet. Die Forscherinnen und Forscher legen diese zellulären Keramiken gezielt auf die Brenner- oder Reformierart auf und entwickeln sie weiter. Spezielle Schaumkeramiken des IKTS verfügen über eine besonders hohe Festigkeit im Temperaturbereich bis 1300 °C.

Schlüsselement Katalysatoren

Leistungsfähige und preiswerte Katalysatoren sind für effiziente Elektrolyseure oder Brennstoffzellen unerlässlich. Hier haben mehrere Fraunhofer-Institute große Expertise aufgebaut mit dem Ziel, sowohl den Einsatz von Edelmetallen zu reduzieren

als auch die Effizienz zu steigern. Im Elektrolyseur gelten dabei für die Wasserstoff-Elektrode völlig andere Anforderungen als für die Sauerstoff-Elektrode. So haben etwa Forscherinnen und Forscher des Fraunhofer ICT im BMBF-Projekt HyCON geträgerte Katalysatoren auf Iridiumoxid-Basis für die Produktion von Sauerstoff entwickelt. Sie untersuchen auch die Steigerung der Aktivität durch Mischoxidbildung oder die Fehlstellenbildung durch Dotierung mit Halogeniden. Auf Grundlage solcher Vorarbeiten lassen sich schließlich bifunktionelle Sauerstoffkatalysatoren für unitäre reversible PEM-Brennstoffzellen realisieren. Auch für unterschiedliche Typen von elektrochemischen Zellen im Nieder- und Mitteltemperaturbereich (bis etwa 200 °C) entwickelt das Fraunhofer ICT Elektrokatalysatoren. So arbeiten die Forscherinnen und Forscher etwa an der Verbesserung von Elektroden für die Hochtemperatur-PEM-Brennstoffzelle. Im Auftrag des Bundesministeriums der Verteidigung wird zudem für diesen Brennstoffzelltyp an Materialien und Systemen geforscht, die mit logistischen Treibstoffen arbeiten können.

Im Bereich des Schwerlastverkehrs können PEM-Brennstoffzellen eine wichtige Rolle spielen, denn sie erzielen eine hohe Leistungsdichte und sehr hohe Dynamiken. Zudem bieten sie auf Grund der Energiedichte des Wasserstoffs für die Anwendung Vorteile gegenüber dem rein batterieelektrischen Antrieb. Hier dienen die Beschichtungen einer Membran als Elektroden. Man spricht dabei auch von einer »Membran-Elektrodeneinheit«, kurz MEA. Im Projekt HyFab arbeitet das Fraunhofer ISE mit Förderung des Landes Baden-Württemberg daran, die funktionalen Zusammenhänge in der Katalysatorschicht aufzuklären sowie Prozesstechnologien für die Massenproduktion von MEAs zu optimieren.

Die Kolleginnen und Kollegen vom Fraunhofer UMSICHT entwickeln ebenfalls neue Katalysatoren für die Wasser- und CO₂-Elektrolyse.

Das Fraunhofer ISC hat sich zum einen auf die Hochskalierung von Katalysatormaterialien und zum anderen auf Katalysatoren für die Nutzung von Wasserstoff, z.B. für die Herstellung solarer Chemikalien, spezialisiert. Damit solche katalytischen Reaktionen großtechnisch möglich werden und nicht nur im Labormaßstab ausreichende Performance und Ausbeute zeigen, müssen vielversprechende Katalysatormaterialien wie z.B. die Photokatalysatoren Titandioxid und graphitisches Carbonnitrid im großen Maßstab zugänglich sein. Im EU-Projekt SPOTLIGHT konnten Katalysatoren, die von Projektpartnern entwickelt wurden¹, am Fraunhofer ISC aufskaliert werden. Dabei wurde die Synthese verschiedener Katalysatormaterialien, die beispielsweise zur Herstellung von Methan und Kohlenstoffmonoxid aus grünem Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid eingesetzt werden, aus dem 100 mg Maßstab in den 100 g Maßstab überführt. Die Performance dieser Katalysatoren zeigt vergleichbare oder bessere Ergebnisse in den Umwandlungsprozessen als die im kleinen Maßstab hergestellten Systeme.

Speichermaterialien

Unterschiedliche Anwendungen von Wasserstoff erfordern auch unterschiedliche Konzepte für Speicherung und Transport des begehrten Gases. Für Transporte unter 100 Kilometern entwickelt das Fraunhofer IFF einen portablen, modularen H₂-Speicher, der weniger als 750 Kilogramm wiegt und sich auf »grüne« Kleintransporter laden lässt. Speichern lässt sich Wasserstoff auch in LOHC-Speichern, kurz für »Liquid Organic Hydrogen Carrier«. Dabei wird H₂ chemisch an ein Trägeröl gebunden – aufwendige Druckspeicher oder Kühlanlagen sind überflüssig. Europas ersten LOHC-Speicher neuester Generation haben Forscher am Fraunhofer IAO aufgebaut: Er hat eine Speicherkapazität von 2000 Kilowattstunden. Das Fraunhofer IFAM in Dresden entwickelt als Alternative eine einfach handhabbare »PowerPaste«, in der sich Wasserstoff bei Raumtemperatur und Umgebungsdruck chemisch speichern lässt. Wird er benötigt, lässt er sich über die Zugabe von Wasser bedarfsgerecht freisetzen.

¹ TNO Innovation for life, Uni Hasselt



100 Liter-Synthesereaktor für die Hochskalierung von Katalysatormaterialien in den industriellen Technikumsmaßstab am Fraunhofer ISC, gekoppelt mit verschiedenen in-line-Analysetechnologien



ThermoOptische Messanlagen (TOM) zur in-situ-Untersuchung des Einflusses von Wasserstoff und der Wasserstoffverbrennungsumgebung auf das Brenngut und die Ofenkomponenten

Einfluss von Wasserstoff und dessen Verbrennungsprodukt Wasser auf Thermo- prozesse und Brenngut

Die Nutzung von Wasserstoff zur Reduzierung des CO₂-Footprints von Thermo- prozessen ist ein wichtiger Pfad zur Erreichung der Klimaziele. Dies gilt insbesondere bei Prozessen, bei denen eine Elektrifizierung nicht möglich ist. Die Verbrennung von Wasserstoff führt je nach Einstellung der Brenner und der Verbrennungsbedingungen zu signifikant höheren Verbrennungstemperaturen und Gasvolumenströmen sowie erhöhten Wasseranteilen in der Gasatmosphäre. Dieser erhöhte Wasseranteil kann sich sowohl auf das Produkt im Ofen als auch auf die Ofenkomponenten auswirken. Hier sind neben den Brennern vor allem die Feuerfestauskleidung und Brennhilfsmittel betroffen. Das Fraunhofer ISC hat spezielle Öfen, in denen der Einfluss erhöhter Wasserdampfanteile (bis 100%) auf das Brenngut und Ofenkomponenten in-situ untersucht werden kann. Zusätzlich liegt ein breites Spektrum an Analysemethoden, u.a. im Zentrum für Angewandte Analytik ZAA, zur anschließenden Untersuchung der innerhalb der Materialien abgelaufenen Reaktionen am Fraunhofer ISC vor. Basierend auf den Ergebnissen können unter Verwendung von selbstentwickelten Simulations-Tools angepasste Ofenprogramme, Ofenmaterialien und Beschichtungen vorgeschlagen und entwickelt werden. Neben dem Einfluss des Wasseranteils kann auch der Einfluss des Wasserstoffs oder anderer Gase bis zu 1800 °C untersucht werden.

Barrierschichten

Für die Verkapselung von empfindlichen Bauteilen, die Separation von Gasströmen oder den Transport von Gasen müssen die beteiligten Materialien gasdicht sein. Für solche Anwendungen werden häufig Kunststoffbauteile oder -folien eingesetzt, da sie flexibel, kostengünstig und leicht in verschiedenen Geometrien hergestellt werden können. Allerdings weisen Kunststoffe eine sehr begrenzte Migrationsbarriere gegenüber unpolaren Gasen (z. B. Sauerstoff oder Stickstoff) auf. Aus diesem Grund müssen sie modifiziert werden. Eine besonders materialsparende und damit nachhaltige Möglichkeit ist der Einsatz von Funktionsschichten, die diese Gasbarriere übernehmen. Solche Schichten sind zentraler Bestandteil vieler Verpackungsanwendungen und ein bedeutsamer Forschungsschwerpunkt z. B. bei Fraunhofer Allianz POLO.

Neben Aufdampf-, Sputter- und Plasmaschichten, eignen sich vor allem funktionale hybridpolymere Schichtsysteme (z. B. ORMOCER®-Materialien des Fraunhofer ISC), um aufgrund ihrer anorganischen und organischen Vernetzung innerhalb ein und derselben Matrix eine wirksame Barriere gegenüber Sauerstoff aufzubauen. Durch die hohe Netzwerkichte und eine geeignete Polarität können Kunststofffolien durch ORMOCER®-Funktionsschichten von Migrationswerten über 1300 auf unter 15 cm³/m²dbar reduziert werden. Da die Schichten sehr flexibel und nur wenige Mikrometer dick sind, können auch sehr dünne



Einsatz von Barrierschichten in industriellen Produktionsanlagen

Folien damit ausgerüstet werden. Die genannten Beschichtungsmaterialien werden durch einfache Synthese (z. B. in dem auf Seite 45 gezeigtem Synthesereaktor) hergestellt und können mit gängigen Methoden (z. B. Sprühen) auf 2D- und auf 3D-Oberflächen appliziert werden. Eine weitere Verbesserung des Eigenschaftsprofils hinsichtlich der Barrierewirkung kann durch die zusätzliche Additivierung mit Partikeln erreicht werden.

Zukünftig werden nach ähnlichen Funktionsprinzipien und z. B. durch den Einsatz von (Schicht-)Silikaten Wasserstoffbarrierschichten entwickelt. Durch die Verwendung von kristallinen, anorganischen Nanofüllstoffen wird die Permeabilität der Polymermatrix durch die Verlängerung des Diffusionsweges der Permeate deutlich reduziert, sodass durch den Einsatz von Wasserstoffbarrierschichten vor allem die Verluste beim Transport von Wasserstoff reduziert und die Barriereigenschaften unter hohem Druck signifikant verbessert werden können.

Kompetenzaufbau für den Wandel zum Energieträger Wasserstoff – Werden auch Sie Wasserstoff-Pionier*in mit Fraunhofer Know-how!

Aktuelle Erkenntnisse aus der angewandten Forschung bilden die Wissensgrundlage für die berufsbegleitenden Weiterbildungsformate, die Fraunhofer-Institute gemeinsam mit der Fraunhofer Academy entwickeln und einer breiten Zielgruppe anbieten.

Mit der Dekarbonisierung der Industrie stehen wir vor einer der größten industriellen Transformationen, die den bereits bestehenden Fach- und Führungskräftebedarf noch verschärft. Für das Gelingen der Transformation ist neben Forschung, Entwicklung und Innovation vor allem die Qualifizierung von Fachkräften einer der entscheidenden Erfolgsfaktoren. Die Weiterbildung der Fraunhofer-Gesellschaft leistet somit einen maßgeblichen Beitrag zum Prozess der Transformation durch angewandtes Wissen in der Wirtschaft.

Noch offene Fragen und Gegenstand aktueller Forschung sind unter anderem: Wo steht mein Unternehmen in der Wertschöpfungskette Wasserstoff? Wie stark bin ich von der Transformation tatsächlich betroffen? Welche Kompetenzen benötigen meine Mitarbeitenden, um mein Unternehmen sicher auf den Weg in eine nachhaltige Zukunft zu bringen?

Bis 2030 rechnen wasserstoffnahe Branchen mit einem Bedarf von rund 70.000 zusätzlichen Fach- und Führungskräften. Sie benötigen Wissen, Fähigkeiten und Fachkompetenzen, um die komplexen Herausforderungen zu bewältigen. Das Weiterbildungsangebot von Fraunhofer unterstützt sie dabei.

Das Themenfeld Wasserstoff koppelt unterschiedliche Sektoren und damit auch ein breites Spektrum an Berufsfeldern und -profilen. Akteure in Wirtschaft, Behörden, Förderinstitutionen und öffentlichen Organisationen werden in Zukunft vermehrt über Wasserstoffprojekte entscheiden müssen.

Dazu ist eine entsprechende Wasserstoffexpertise notwendig. Diese muss in passgenauen Formaten zur Verfügung gestellt werden – auch für Beratungsunternehmen, Banken und Versicherungen.

Die Fraunhofer Academy bietet Orientierung und Standortbestimmung in verschiedenen Lernformaten wie Workshops, Trainings und umfassenderen Weiterbildungsprogrammen durch gebündeltes Know-how-Transfer zum Themenfeld Wasserstoff. Die Angebote für Fach- und Führungskräfte aus den Branchen, die zur Transformation beitragen, bieten sowohl Grundlagen als auch hoch spezialisiertes Wissen zur Erzeugung und Einsatz von grünem Strom, geben Antworten auf Fragen zur Sicherheit in der Produktion, Prozessoptimierungen und Mobilität. Melden Sie sich noch heute an und gestalten Sie die Zukunft mit!

Wasserstoff | Weiterbildungen

Wie kann Ihr Unternehmen von Wasserstoff profitieren? Welche Richtung soll es in der Transformation einschlagen? Wir unterstützen bei der Richtungsfindung.



Fit4H2-live: Versuchsfeldrundgang im Fraunhofer IWU



Fit4H2: Schulung zur Produktion von Wasserstoff-Systemen (IWU, ENAS)

Wasserstofftechnologien spielen eine zentrale Rolle, um die globalen Klimaziele zu erreichen. Schlüsselemente dabei sind Systeme zur Wandlung erneuerbarer Energien zu Wasserstoff (Elektrolyseur) bzw. dessen Rückverstromung (Brennstoffzelle). Derzeit werden diese nur in geringen Stückzahlen hergestellt. Für eine konsequente Reduzierung der CO₂-Emissionen sowie den Aufbau einer globalen wasserstoffbasierten Wirtschaft und Gesellschaft muss sich die Verfügbarkeit jedoch erheblich verbessern – bei deutlich sinkenden Kosten. Dazu bedarf es einer industriellen Massenproduktion, die wiederum ohne Wertschöpfungsnetzwerke und die entsprechenden Fertigungstechnologien nicht denkbar ist.

Im Fit4H2-Schulungsworkshop werden die wesentlichen Komponenten von Elektrolyseur und Brennstoffzelle vorgestellt

und mit substanziellem Wissen zu deren Produktionstechnologien gekoppelt. Darüber hinaus wird das wirtschaftliche Potenzial der Fertigung analysiert. Ziel ist es, einen Marktüberblick und konkrete Anknüpfungspunkte für den Einstieg Ihres Unternehmens in die Wertschöpfungskette der Wasserstoffsystemproduktion zu vermitteln.

Schulung Fit4H2

Produktion von Wasserstoffsystemen: Elektrolyseur und Brennstoffzelle



Wasserstoffherzeugung – Grüner Strom macht grünen Wasserstoff (IWES, IKTS, IST, IMW, IMWS, CSP)

Zur Sicherstellung nachhaltiger Energieversorgung und Produktionsprozessen in Ihrem Unternehmen ist es mittelfristig notwendig von fossilen Energieträgern auf klimaneutrale Alternativen umzusteigen. Das Weiterbildungsprogramm „Praxiswissen für Wasserstoffprojekte“ setzt hier an und richtet sich an Projektplaner*innen, Ingenieur*innen und Fachkräfte der Industrie, die den Wandel ihres Unternehmens mitgestalten und diesbezüglich Entscheidungen treffen. Sie lernen anwendungsbezogen die technologische Erzeugung von grünem Wasserstoff. Wir zeigen Ihnen auf, wie Wasserstoff als Energieträger dient und als chemischer Baustoff in industriellen Prozessen eingesetzt werden kann. Sie lernen Herausforderungen, z.B. der Fabriktransformation, anhand von realen Fallstudien und Exkursionen zu lösen. Anhand von praktischen Beispielen zeigen wir Ihnen, wie Sie die CO₂-Emissionen Ihres Unternehmens signifikant reduzieren können. Unsere Expert*innen vermitteln Ihnen die rechtlichen, wirtschaftlichen und sicherheitstechnischen

Rahmenbedingungen entlang der Wasserstoffwertschöpfungskette. Die Inhalte helfen Ihnen zu entscheiden, an welcher Stelle Ihres Produktionsprozesses Wasserstoff eingesetzt und Ihr Unternehmen somit schneller dekarbonisiert werden kann. Das Weiterbildungsprogramm setzt sich aus fünf einzeln anwählbaren Lerneinheiten zusammen. Nach erfolgreicher Zertifizierungsprüfung erhalten Sie ein Fraunhofer Personen-Zertifikat nach ISO 17024.

Praxiswissen für Wasserstoffprojekte

Von der Planung über die Umsetzung bis zum Betrieb.





Eindrücke aus der Weiterbildung »Energiewende praktisch«

»Energiewende praktisch/in der Praxis« – Fachwissen für Ihren Umstieg auf Wasserstoff (IST)

Die Energiewende ist ein sehr dynamischer Prozess, der den Erwerb von neuen Kompetenzen und Technologien erfordert. Die Weiterbildung »Energiewende praktisch« vermittelt sowohl die Einzelbausteine als auch die Zusammenhänge der gesamten Wertschöpfungskette der Wasserstoffwirtschaft. Hier erfahren Planende, Managementbeauftragte, Ingenieur*innen, Mitarbeitende von kommunalen Versorgungsunternehmen, Meister*innen und Fachkundige, aber auch Beratende aus Politik, Behörden und Banken wie grüner Wasserstoff gewonnen, transportiert und in die Anwendung gebracht werden kann.

Das Schulungsprogramm ist berufsbegleitend und lässt sich auf Wunsch genau auf Ihren Bedarf zuschneiden. Wählen Sie den Grundlagenkurs oder eine Variante der Weiterbildung mit dem Personenzertifikat »Fachkundige*r Wasserstoff mit TÜV Rheinland geprüfter Qualifikation«.

Dabei teilen wir unser aktuelles Know-how aus der Forschung und zeigen Ihnen mithilfe unserer Partnerunternehmen aus der Industrie, wie Wasserstoff schon jetzt Anwendung in Unternehmen findet. Sie bekommen die Gelegenheit, sich mit Forschenden und Nutzenden über den Energiekreislauf und die Fabriktransformation auszutauschen.

H₂-Kompetenzen für Ihr Unternehmen

Mit Wasserstoff sicher in die Zukunft – Lernen Sie dafür genau das, was Sie wissen müssen.



© Fraunhofer IWES / Nadja Mahjoub Fotografie



Telsche Nielsen
Leiterin Wissenstransfer & Hochschulkooperationen am Fraunhofer IWES

Spezialierter, individueller Wissenstransfer aus der aktuellen angewandten Forschung und Entwicklung für die Industrie ist unsere besondere Stärke auf dem Weiterbildungsmarkt.«

Der Prozess der Dekarbonisierung durch Wasserstofftechnologien darf nicht ausschließlich aus der Sicht von Technologie und Innovation betrachtet werden. Der Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft hängt entscheidend von der Qualifizierung der Fach- und Führungskräfte ab.«

Viktor Deleski
Bildungsmanager, Fraunhofer Academy



© Fraunhofer Academy

Wasserstoff-Anwendungen in der Mobilität – Was kann Wasserstoff für die Mobilität der Zukunft leisten?

Die Mobilität der Zukunft ist klimaneutral und nachhaltig. Welchen Beitrag Wasserstoff dazu leisten kann, vermittelt das Weiterbildungsprogramm »Wasserstoff-Anwendungen in der Mobilität« des Fraunhofer IFAM.

Präsenztermine am Fraunhofer IFAM in Bremen statt. Dabei erhalten Sie praxisnahe Einblicke in Anwendungsmöglichkeiten sowie neueste Forschungserkenntnisse.

Das berufsbegleitende Weiterbildungsprogramm im Blended-Learning-Format umfasst fünf Lerneinheiten. Darin wird neben den Grundlagen der Wasserstofftechnologie auch auf die Sicherheit bei wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen eingegangen. Praxisnahe Inhalte zur Brennstoffzelle, Speicherung und Infrastruktur sowie zu Wasserstoff in der Energiewende runden das Programm ab. Die Experten vom Fraunhofer IFAM vermitteln den Großteil der Lerninhalte online auf einer Lernplattform. Dies ermöglicht den Teilnehmenden, die Inhalte während der gesamten Weiterbildung ohne Zeitdruck, wann, wo und so oft wie gewünscht zu bearbeiten. Zu ausgewählten Lerninhalten finden

Nach erfolgreichem Abschluss erhalten die Teilnehmenden das Fraunhofer Personen-Zertifikat »Professional für Wasserstoff-Anwendungen in der Mobilität«.

Wasserstoff-Anwendungen in der Mobilität

Die Mobilität der Zukunft ist klimaneutral und nachhaltig – Welchen Beitrag kann Wasserstoff dazu leisten?



Alkalische Elektrolysetechnologie zum Anfassen – Was ist der Stand der Technik?

Die Entwicklung der alkalischen Elektrolysetechnologie hat ein beeindruckendes Tempo in den letzten Jahren aufgenommen. Dabei werden immer neue verfahrenstechnische Ansätze verfolgt und viele innovative Materialien entwickelt. Der Workshop **„Alkalische Elektrolysetechnologie zum Anfassen“** legt den Stand der Technik von alkalischen Elektrolyseuren (AEL) und Anionenaustauschermembran-Elektrolyseuren (AEMEL) dar und gibt einen Einblick in die neuesten Entwicklungen (Teilnehmerzahl bis zu 8 Personen). Dabei erhalten die Teilnehmer eine Übersicht sowohl zum Stackdesign als auch zu den verwendeten Komponenten (Elektroden [PTL und Katalysatorbeschichtung], Dichtungen, Separatoren, Bipolarplatten usw.). Weitere Punkte sind die Betrachtung von Kosten der Systeme und die Roadmap der Technologie. Abgerundet wird der 1,5 Tage Workshop mit einer anschaulichen Erklärung des Elektrolyse Systems an einer industriellen AEL-Anlage. Bei Bedarf bietet das Team auch den händischen Zusammenbau einer Elektrolysezelle mit Implementierung in eine Testinfrastruktur an. Die Technologie kann am IFAM somit im wörtlichen Sinne „angefasst“ werden.

Parallel zum individuellen Workshop für einzelne Unternehmen organisiert das IFAM einen jährlichen Industrie Workshop mit dem Fokus auf die alkalischen Systeme: „Industry Workshop Advanced Alkaline Electrolysis“. 2024 wird der siebte Workshop mit derzeit bis zu 100 Teilnehmern stattfinden. Externe Referenten aus der Industrie (Elektrolyseurbauer und der Zulieferindustrie) geben Einblicke zum Stand der Technik und flankiert wird durch Vorträge von Forschungsinstituten zu den neuesten Entwicklungen.

Alkalische Elektrolysetechnologie zum Anfassen

Der Fokus-Workshop zur alkalischen Elektrolyse (AEL/AEMEL) richtet sich an Fach- und Führungskräfte.



Fraunhofer-Wasserstoff-Netzwerk

Fraunhofer-Institut für Kurzzeitdynamik, Ernst-Mach-Institut EMI
Freiburg, Dr. Alexander Stolz

Fraunhofer-Institut für Elektronische Nanosysteme ENAS
Chemnitz, Dr. Andreas Willert

Fraunhofer-Institut für Organische Elektronik, Elektronenstrahl und Plasmatechnik FEB
Dresden, Dr. Nicolas Schiller

Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO
Stuttgart, Dr.-Ing. Florian Herrmann

Fraunhofer-Institut für Angewandte Polymerforschung IAP
Potsdam, Dr. Christoph Gimmler

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP
Stuttgart, Dr.-Ing. Robert Ilg

Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT
Pfinztal, Dipl.-Phys. Wilhelm Eckl

Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik IEE
Kassel, Jochen Bard

Fraunhofer-Einrichtung für Energieinfrastrukturen und Geothermie IEG
Cottbus, Prof. Dr. Mario Ragwitz

Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM
Institutsteil Dresden, Dr.-Ing. Felix Heubner

Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF
Magdeburg, Dr.-Ing. Torsten Birth

Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik IGB
Stuttgart, Dr. Arne Roth

Fraunhofer-Institut für Großstrukturen in der Produktionstechnik IGP
Rostock, Dr.-Ing. Benjamin Illgen

Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS
Erlangen, Prof. Dr. Randolph Hanke

Fraunhofer-Institut für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie IISB
Erlangen, Prof. Dr. Martin März

Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme IKTS
Dresden, Priv.-Doz. Dr.-Ing. habil. Matthias Jahn

Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT
Aachen, Dr.-Ing. Arnold Gillner

Fraunhofer-Institut für Mikroelektronische Schaltungen und Systeme IMS
Duisburg, Holger Kappert

Fraunhofer-Institut für Mikroelektronische Schaltungen und Systeme IMS
Duisburg, Holger Kappert

Fraunhofer-Zentrum für Internationales Management und Wissensökonomie IMW
Leipzig, Dr. Daniela Pufky-Heinrich

Fraunhofer-Institut für Mikrostruktur von Werkstoffen und Systemen IMWS
Halle, Dr. Klemens Ilse

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA
Stuttgart, Prof. Dr.-Ing. Alexander Sauer

Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik IPM
Freiburg, Prof. Dr. Jürgen Wöllestein

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT
Aachen, Dr.-Ing. Christoph Baum

Fraunhofer-Institut für Silicatiforschung ISC
Würzburg, Dr. Jürgen Meinhardt

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
Freiburg, Prof. Dr. Christopher Hebling

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI
Karlsruhe, Prof. Dr. Martin Wietschel

Fraunhofer-Institut für Schicht- und Oberflächentechnik IST
Braunschweig, Prof. Dr.-Ing. Sabrina Zellmer

Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme IVI
Dresden, Dr. Martin Ufert

Fraunhofer-Institut für Windenergiesysteme IWES
Bremerhaven, Nora Denecke

Fraunhofer-Einrichtung für Wertstoffkreisläufe und Ressourcenstrategie IWKS
Hanau, Dr. Benjamin Balke

Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM
Freiburg, Prof. Dr. Christian Elsässer

Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS
Dresden, Dr.-Ing. Teja Roch

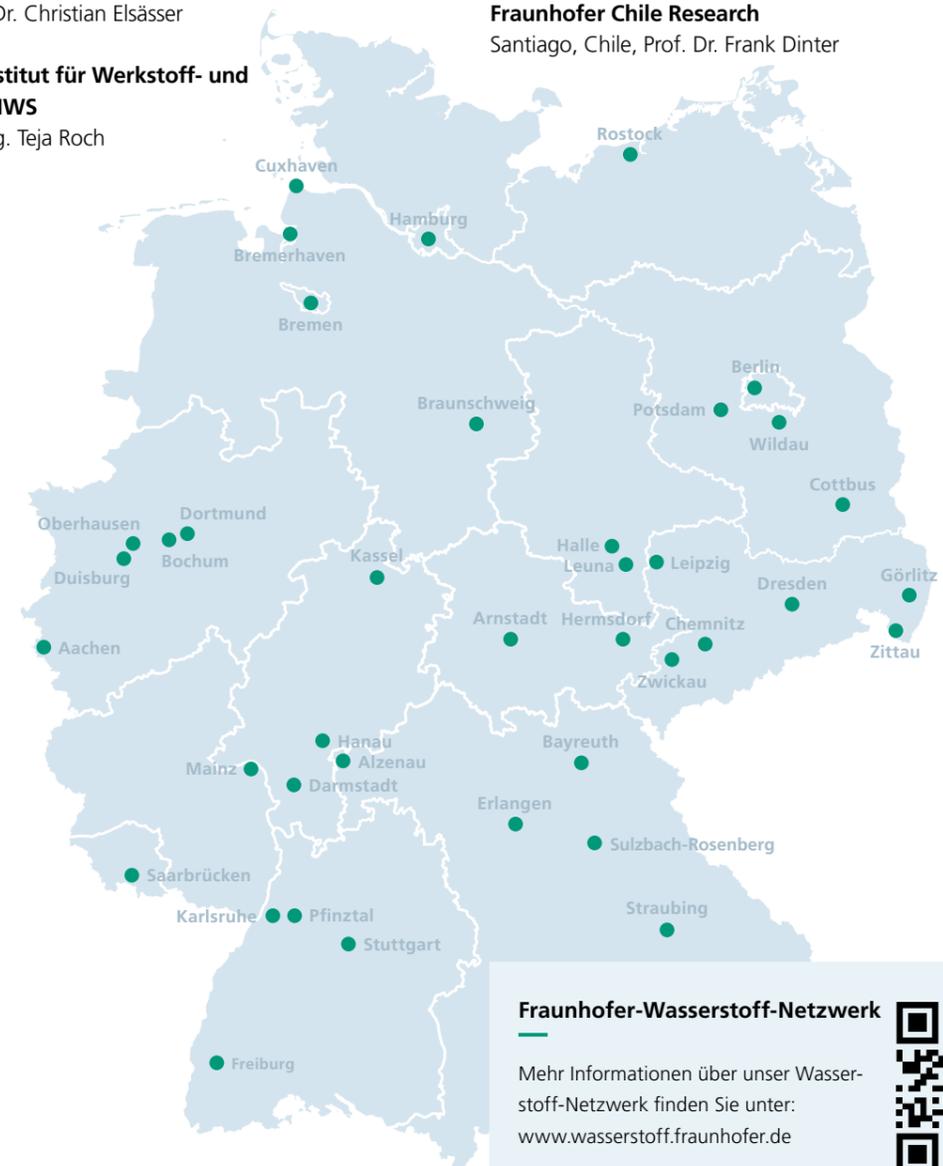
Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU
Chemnitz, Dr. Ulrike Beyer

Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP
Saarbrücken, Prof. Dr. Hans-Georg Herrmann

Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF
Darmstadt, Dr. Christoph Bleicher

Fraunhofer-Institut für Umwelt- Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT
Oberhausen, Prof. Dr. Christian Doetsch

Fraunhofer Chile Research
Santiago, Chile, Prof. Dr. Frank Dinter



Fraunhofer-Wasserstoff-Netzwerk

Mehr Informationen über unser Wasserstoff-Netzwerk finden Sie unter:
www.wasserstoff.fraunhofer.de



