

HESSEN



TECHNOLOGIELAND
HESSEN

VERNETZT.
ZUKUNFT.
GESTALTEN.

technologieland-hessen.de



Materials to RePowerEU

Innovationen für die Wasserstoffwirtschaft



Hydrogen

Hydro

2
EN

H
HYDRO

ENERGY

HYDROGEN

Inhalt

- 2 **Zitat des Hessischen Wirtschaftsministers**
- 4 **Wasserstoff ist der Energieträger der Zukunft**
- 6 **Fakten zum Wasserstoff**
- 8 **H₂ - Die Herstellung**
Giga is beautiful
- 12 **H₂ - Der Transport**
Wo fließt er denn?
- 16 **H₂ - Die Sicherheit**
Safety first!
- 20 **H₂ - Einsatz für die Mobilität**
Verkehr gibt Gas
- 24 **H₂ - Einsatz für Industrie und Wärme**
Betriebe und Versorger setzen an zur Wende
- 28 **Interview mit Oliver Eich**
LandesEnergieAgentur Hessen
- 32 **Materials Valley**
- 33 **Technologieland Hessen**
- 34 **Impressum**

»» *Oft wird vergessen, wie
elementar innovative
Materialtechnologien
für den Aufbau einer
Wasserstoffwirtschaft sind.
Hessische Firmen sind
hier weltweit Vorreiter!* ««

*Tarek Al-Wazir
Hessischer Minister für Wirtschaft,
Energie, Verkehr und Wohnen*



Veranstaltungsreihe „Materials to RePowerEU – Innovationen für die Wasserstoffwirtschaft“

„Wasserstoff ist der Energieträger der Zukunft“

Wer aktuelle Nachrichten verfolgt, den wird diese Aussage wohl kaum verwundern. Immerhin hat das erste und kleinste der chemischen Elemente in den letzten drei Jahren seinen festen Ankerplatz in der alltäglichen Diskussion von Industrie, Wirtschaft, Politik, Forschung und breiten Teilen unserer Gesellschaft gefunden.

In diesem Zuge hat die Europäische Kommission mit RePowerEU einen Maßnahmenkatalog präsentiert, der die Energiesicherheit Europas sicherstellen und klimaverträglich gestalten soll. Darin betont Brüssel, wie eine Diversifizierung unserer Energieversorgung aussehen kann. Dass diese klimaneutral sein muss, ist für RePowerEU als Teil des European Green Deals eine Selbstverständlichkeit.

Der zuweilen auch als Champagner der Energiewende gepriesene Wasserstoff wird dabei nach dem Willen der Kommission eine tragende Rolle spielen. Allein in der 24-seitigen Verkündung von RePowerEU taucht das Wort Wasserstoff 52 Mal auf. Zudem werden ehrgeizige Ziele definiert: Bis 2030 sollen jährlich mindestens zehn Millionen Tonnen Wasserstoff in Europa aus erneuerbaren Quellen produziert und weitere zehn Millionen Tonnen jährlich importiert werden. Auch die deutsche Bundesregierung und die hessische Landesregierung haben längst eigene Strategien und Ziele rund um Wasserstoff definiert.

Dennoch müssen noch viele offene Fragen beantwortet werden: Wie kann Wasserstoff in großen Mengen produziert werden? Wie kann Wasserstoff über weite Strecken sicher, effizient und wirtschaftlich transportiert werden? Wie sicher ist der Umgang mit dem entzündlichen Gas überhaupt und in welchen Anwendungen ist er unverzichtbar?

Um diese und mehr Fragen zu beantworten und damit der Traum von einer klimaneutralen Gesellschaft mit Wasserstoff als einer dafür wichtigen Basis in Erfüllung gehen kann, benötigen Europa, Deutschland und Hessen technisch und wirtschaftlich tragfähige Lösungen.

Welchen Beitrag Materialinnovationen dazu leisten werden und wie weit Wasserstoff bereits in die Nähe seiner Anwendungsfelder gerückt ist, sind Fragen, die wir uns bei [Technologieland Hessen](#) und [Materials Valley e.V.](#) in der Veranstaltungsreihe [Materials to RePowerEU](#) gestellt haben.

Gegliedert in die Themen Herstellung, Transport, Sicherheit und Zuverlässigkeit, Mobilität sowie Industrie und Wärme haben wir seit Oktober 2022 gemeinsam mit 68 Expertinnen und Experten aus Wirtschaft, Forschung und Politik die Rolle von Materialien in einer globalen Wasserstoffwirtschaft erörtert und diskutiert.

An vielen Stellen wurde dabei deutlich, dass zahlreiche Technologien bereits „H2-ready“ und großflächig einsetzbar sind. Zugleich zeigte sich aber auch, wie groß der Bedarf an Forschung und Entwicklung weiterhin ist. Es gibt noch viele Stellschrauben, um Effizienz und Zuverlässigkeit weiter zu steigern und neue Anwendungsfälle zu erschließen. Manche Fragen tauchen erst auf, wenn die ersten Schritte in Richtung Wasserstoff unternommen werden. Wir möchten dies als Plädoyer für einen schnellen Einstieg verstanden wissen, unterstreichen aber auch den fortlaufenden Bedarf an öffentlicher Unterstützung.

In mehreren Veranstaltungen diskutierten wir zudem intensiv das Thema kritischer Rohstoffe. Sie bilden die Basis vieler Materialien, die zur klimafreundlichen Wasser-



stoffherzeugung wichtig sind. Ganz besonders, wenn diese im Gigawattmaßstab angewendet werden sollen, ist noch nicht klar, wie eine ausreichende Versorgung mit diesen Rohstoffen gesichert werden kann. Das sind Fragen, die sich besonders durch effizientes Materialdesign, beispielsweise zur Reduktion der Anteile solcher Elemente, beantworten lassen. Aber auch die politischen Rahmenbedingungen müssen dazu passen. Den European Critical Raw Materials Act betrachten wir dabei als eine erste Antwort.

Andere Lösungsansätze kommen hingegen aus der Abfallverwertung – so kann Wasserstoff zum Beispiel auch aus Atemschutzmasken und Plastik gewonnen werden. Auch bei der Nutzung von Wasserstoff gehen die diskutierten Technologien bereits im Ansatz weit auseinander. Von der Brennstoffzelle über synthetische Kraftstoffe und Grundstoffe für die chemische Industrie bis hin zur Verbrennung von Wasserstoff – die Vielseitigkeit des Elements offeriert für nahezu alle Bereiche einen mitunter beträchtlichen Nutzen.

Doch auch regionale Bezüge wurden zum Thema. So stellt sich zum einen die Frage, wo der Wasserstoff erzeugt wird – dezentral und direkt bei den Abnehmern oder mit langen Transportwegen nahe den großen Energiequellen unserer Welt.

Dabei ist klargeworden, wie bedeutsam die Rolle von Wasserstoff für das Land Hessen sein wird – aufgrund seiner zentralen Lage und seiner starken sowie innovativen Industrie. Neben Großabnehmern wie der chemischen Industrie, dem Frankfurter Flughafen und dem Schwerlast- und Zugverkehr sind hier nämlich auch viele der Unternehmen ansässig, die gerade jene Materialinnovationen vertreiben und entwickeln, die für jede Wasserstoffwirtschaft unerlässlich sind. Flankiert von einer so angesehenen wie engagierten Forschungslandschaft, aktiven Netzwerken und zahlreichen privaten Initiativen sind hier die Potenziale nicht nur besonders groß, sondern auch besonders unterstützenswert.

Die Ergebnisse von sieben Monaten **Materials to RePowerEU** sind vielfältig, überraschend und geben auch an vielen Stellen Anlass zum Nachdenken. Deshalb haben wir sie zusammengetragen und für Sie in dieser Broschüre veröffentlicht.

Wir hoffen, Sie genießen die Lektüre und kommen wie wir zu dem Schluss: **Europa, Deutschland, Hessen und die Welt brauchen Wasserstoff. Und Wasserstoff braucht innovative Materialien!**

Ihr Team des Technologielands Hessen
und des Materials Valley e.V.

Fakten zum Wasserstoff

Wasserstoff ist nicht selten, es ist das häufigste Element im Universum.

Als kleinstes und einfachstes Molekül stand es vor Milliarden von Jahren am Anfang der Existenz chemischer Elemente. Auf der Erde ist Wasserstoff allerdings nicht frei verfügbar, sondern stets gebunden – in Wasser natürlich, aber auch in Erdöl, Erdgas, Biomasse, in Chemikalien wie Ammoniak oder Methanol und in zahlreichen Mineralien.

Will man das Element nutzen, also beispielsweise zur Wärmegewinnung verbrennen oder in einer Brennstoffzelle damit Strom erzeugen, muss die molekulare Wasserstoffbindung gelöst werden. Das erfordert einiges an Energie. Das weltweit wichtigste Herstellungsverfahren ist seit vielen Jahrzehnten die sogenannte **Dampf-reformierung**, bei der ein H₂-reicher Grundstoff – in aller Regel Erdgas – bei hohen Temperaturen so stark unter Druck gesetzt wird, dass er den Wasserstoff freigibt. Dabei entstehen allerdings auch große Mengen Klimagase: pro Tonne Wasserstoff rund zehn Tonnen CO₂. Der Ausbau erneuerbarer Energien soll das ändern: Mit Ökostrom kann Wasserstoff CO₂-frei durch die **Elektrolyse** gewonnen werden, indem Wasser in seine Elemente H₂ und O₂ zerlegt wird. Der Bau der dafür notwendigen großen Elektrolyseanlagen hat vor allem in sonnenreichen Regionen begonnen.

Wasserstoff ist nicht grün, aber eben auch nicht grau, blau oder türkis. Das Gas ist unsichtbar. In der wissenschaftlichen, politischen und öffentlichen Debatte um den neuen Energieträger hilft die Farbenlehre allerdings enorm:

Wasserstoff aus der heute üblichen Dampfreformierung ist **grau**. Wird das CO₂ aus der Herstellung aufgefangen und in geologischen Lagerstätten gespeichert oder chemisch weiterverwendet, spricht man von **blauem** Wasserstoff. **Brauner** Wasserstoff entsteht aus der Vergasung von Kohle. **Pink** ist Wasserstoff aus der Elektrolyse mit Strom aus Kernenergie, **weiß**, wenn er als Nebenprodukt von chemischen Prozessen wie der Chlorherstellung anfällt. **Türkis** nennt man das Gas, wenn es aus Methanol abgespalten wird. Aber als Schlüssel der Energiewende gilt **grüner** Wasserstoff. Er entsteht durch Wasserelektrolyse mit Strom aus erneuerbaren Energien. Unabhängig von der gewählten Elektrolysetechnologie erzeugt dieser Prozess keine Treibhausgase.

Im Wesentlichen spiegeln also die vielen Farben wider, dass zwischen der heutigen, klimaschädlichen Produktionsweise und dem CO₂-freien Ideal Kompromisse und Etappenziele liegen – Methoden beispielsweise, die weiter fossile Ausgangsstoffe nutzen, aber die Emissionen reduzieren, oder Verfahren, die neue Rohstoffe erproben.

Für Wasserstoff muss nicht alles neu gebaut werden. Der Großteil des bestehenden Erdgasnetzes kann auch für Wasserstoff genutzt werden, schon heute werden probeweise bis zu 30 Prozent Wasserstoff dem Erdgas beigemischt. Schwieriger wird es, wenn reiner Wasserstoff transportiert werden soll. H_2 ist ein sehr kleines Molekül und kann daher durch die meisten Kunststoffe, durch Quarzglas, Stahl und andere Metalle diffundieren. Materialien, aus denen beispielsweise Speichertanks, Pipelines, Leitungen oder Ventile bestehen, müssen daher so optimiert werden, dass sie dicht halten.

Die Wende hin zum Wasserstoff bringt aber durchaus auch Neuerungen hervor. Bezogen auf Masse oder Volumen ist das Gas von Natur aus kein besonders gehaltvoller Energieträger. Die Frage, wie ausreichende Mengen wirtschaftlich über weite Strecken und über die Ozeane zum Abnehmer gelangen, ist daher entscheidend für eine globale Wasserstoffwirtschaft. In Fachkreisen geht man davon aus, dass H_2 nicht als reines Element, sondern gebunden in Chemikalien, beispielsweise Ammoniak oder Methanol, transportiert werden wird. Neu ist auch, dass die Energieversorgung im postfossilen Zeitalter dezentralisiert wird. Die Zahl der Herstellerländer wird größer sein als bei Öl und Gas.

Wasserstoff löst nicht alle Energieprobleme. Schon deshalb nicht, weil weder morgen noch übermorgen genügend Wasserstoff für alle Sektoren, die ihn nutzen wollen, verfügbar sein wird. Kein Versorger, kein Unternehmen und auch nicht Behörden und Kommunen können derzeit mit Sicherheit sagen, wann, wo und wie viel klimaneutraler Wasserstoff zur Verfügung steht. Dennoch gilt: Planung und Vorbereitung ist alles. Forschung und Industrie, gerade auch in Hessen, entwickeln mit Hochdruck technische Lösungen für die gesamte Wertschöpfungskette. Kommunen und Versorger erstellen Fahrpläne für die richtigen Entscheidungen und gezielte Investitionen.

Zudem sind nicht alle Sektoren für die Dekarbonisierung auf Wasserstoff angewiesen. In vielen Bereichen werden Treibhausgasemissionen wirksamer reduziert, wenn erneuerbarer Strom direkt eingesetzt wird. Das gilt beispielsweise für Elektroautos und Wärmepumpen zur Gebäudeheizung. Als Brenn-, Kraft- und Rohstoff wird Wasserstoff vor allem in der chemischen Industrie, der Stahlindustrie, für Luftfahrt und Schiffsverkehr benötigt. Entscheidend für den Einstieg in die Wasserstoffwirtschaft ist in jedem Fall eine möglichst präzise Bedarfsanalyse: Wo sind große H_2 -Abnehmer in Industrie und Kommunen? Wie hoch ist deren Bedarf und gibt es andere Optionen zur Dekarbonisierung? Wo ist der Umstieg auf Wasserstoff wirtschaftlich und vor allem auch realisierbar? In der Potenzialanalyse, die die Landesstelle Wasserstoff – zentrale Ansprechpartnerin des Landes Hessen zum Thema Wasserstoff – im Mai 2023 für Hessen vorgelegt hat, finden sich erste Antworten dazu.



H₂ - Die Herstellung

Giga is beautiful

Die Welt dürstet nach Wasserstoff als Energieträger und Rohstoff der Zukunft. Dabei ist die Frage, wie man technisch an Wasserstoff kommt, seit etwa 200 Jahren beantwortet: durch elektrochemische Spaltung von Wasser, die sogenannte Wasserelektrolyse.

Doch bis heute werden Elektrolyseure größtenteils als Einzelstücke mit viel Handarbeit gefertigt. Anlagen vom Fließband gibt es nicht. Das bisher einzige großtechnische Verfahren zur Wasserstoffherstellung ist die Dampfreformierung, bei der in aller Regel Erdgas unter Druck und hohen Temperaturen oxidiert wird und dabei Wasserstoff abspaltet. Dieses Verfahren erzeugt allerdings pro Tonne Wasserstoff (H₂) etwa zehn Tonnen des Klimagases CO₂.

Anders gesagt: Eine breite industrielle Kapazität für eine leistungsfähige und klimaneutrale Wasserstoffgewinnung fehlt bislang.



Auch in den Stacks, den eigentlichen Elektrolyseeinheiten, steckt noch viel Potenzial zur Optimierung. Das Unternehmen **H-Tec Systems GmbH** fertigt besonders leistungsfähige PEM-Stacks mit dünneren Membranen und elektrolytisch aktiveren Flächen. H-Tec Systems stellt in Aussicht, die verbesserten Stacks ab 2024 in einer Giga-Factory in Braak bei Hamburg zu produzieren.

„Bei der alkalischen Wasserelektrolyse wollen wir Nummer eins werden.“

Christian Haas, Thyssenkrupp Nucera GmbH

Anders als PEM kommt die alkalische Elektrolyse (AEL) ohne Edelmetallkatalysatoren aus. AEL-Anlagen sind robust und im Megawattmaßstab bereits im Einsatz. Im Projekt **Prometh2eus** untersuchen mehrere Forschungsinstitute unter anderem, wie die katalytische Beschichtung der Elektroden und das Elektrodendesign für einen industriellen Großeinsatz aussehen müssen.

Die alkalische Elektrolyse hat prozesstechnisch viel mit der Gewinnung von Chlor und Natronlauge gemeinsam. Das ist eine Steilvorlage für den Konzern **Thyssenkrupp**, der über seine Tochter **Nucera GmbH** weltweit Anlagen zur Chlor-Alkali-Elektrolyse vertreibt. Die AEL-Fertigungskapazität von derzeit einem Gigawatt jährlich will Thyssenkrupp Nucera bereits bis 2025 verfünffachen.

Zwischen PEM und AEL liegt ein weites Feld für neue Prozesse und bisher wenig erprobte Optionen. Der Spezialchemiekonzern **Evonik** und die Berliner **Enapter AG** arbeiten beispielsweise an einer Verfahrensvariante mit Anionenaustauschmembran (AEM). Der AEM-Prozess spaltet Wasser unter leicht alkalischen Bedingungen, Iridium und andere Edelmetalle sind für den Prozess nicht notwendig. Evonik hat eine sehr dünne, anionenleitende Membran entwickelt, die den Stromverbrauch der Elektrolyse senkt. Enapter will im nordrhein-westfälischen Saerbeck ab 2023 containergroße Ein-Megawatt-Module für die AEM-Elektrolyse in Serie fertigen.

In der Chemie gilt: Hohe Temperaturen beschleunigen in aller Regel Reaktionen und Prozesse, das gilt auch für die Elektrolyse von Wasser. Daher nutzt die Hochtemperatur-elektrolyse (HTE) den Ausgangsstoff Wasserdampf oder ein Gemisch von Dampf und Kohlendioxid. Das hat den Vorteil, dass sie sowohl Wasserstoff als auch Synthesegas liefert. Hochtemperatur-elektrolyse ist besonders für Industriestandorte geeignet, weil sie Abwärme aus kontinuierlich laufenden Anlagen nutzen und so deutlich höhere elektrische Wirkungsgrade erzielen kann. Der derzeit weltweit erste industrielle Anwender ist die **Salzgitter AG**. Hier erzeugt seit 2019 ein Prototyp der Dresdener **Sunfire GmbH** pro Stunde mithilfe der Abwärme der Stahlproduktion 200 Normkubikmeter Wasserstoff.

„Wasserstoff steckt auch in Coronamasken und Plastikmüll.“

Gert Homm, Fraunhofer IWKS

Wasserstoff steckt nicht nur im Wasser, sondern in großen Mengen auch in organischem Material. Die Frage ist also naheliegend: Lassen sich Biomasse oder Plastikmüll gasifizieren und daraus der Wasserstoff gewinnen? Auf diesem Feld forschen derzeit mehrere Fraunhofer-Institute.



Das **Fraunhofer IWKS** in Hanau/Alzenau untersucht beispielsweise, wie effektiv energiereiches Plasma Kunststoffabfälle in ihre chemischen Bestandteile zerlegt. Versuche mit Coronamasken und Einmalhandschuhen waren erfolgversprechend. Das Material zerfiel innerhalb sehr kurzer Reaktionszeit unter anderem in festen Kohlenstoff und gasförmigen Wasserstoff.

Allerdings liegt bei der Gewinnung von Wasserstoff aus Abfall oder Biomasse die Herausforderung vor allem darin, dass großtechnische Anlagen einen homogenen Input benötigen, also Material mit möglichst definierten und gleichbleibenden Eigenschaften. Organische Stoffe sind aber oft heterogene Gemische mit schwankender Zusammensetzung. Daraus gewonnene Feststoffe und Gase müssen daher aufwändig analysiert, gereinigt und getrennt werden. Noch stehen diese Optionen am Anfang ihrer Entwicklung. Durch Verbesserung von Membran- und Katalysatormaterialien sollen künftig auch hier Produktqualität und Ausbeute deutlich steigen.



H₂ - Der Transport

Wo fließt er denn?

Wasserstoff kann insbesondere dort klimaverträglich hergestellt werden, wo an Wind oder Sonne kein Mangel herrscht. Bis 2030 will die EU zehn Millionen Tonnen grünen Wasserstoff importieren, die ersten Lieferverträge sind geschlossen. Wie aber kommt das Gas aus Marokko oder Australien in die EU, aus Namibia und Abu Dhabi nach Deutschland? Auch in Deutschland müssen die Wege zum Verbraucher wasserstofftauglich sein, damit der begehrte Energieträger problemlos fließen kann.

Wasserstoff ist von Natur aus kein besonders gehaltvoller Energieträger, er hat bei Raumtemperatur einen niedrigen volumetrischen Energiegehalt und einen hohen Dampfdruck. Für eine effiziente Lieferung muss das Gas daher komprimiert, verflüssigt, an einen Träger adsorbiert oder chemisch gebunden werden. Nur dann wird ein Transport ausreichend großer Mengen wirtschaftlich. Das allein reicht noch nicht - bei Transportfragen in einer Wasserstoffwirtschaft geht es nicht nur um die Distanzen, sondern auch um regionale Aspekte der Erzeugung, die konkrete Anwendung und die benötigte Reinheit.

In Europa entsteht derzeit auf Basis der bestehenden Erdgasnetze das European Hydrogen Backbone: Bis 2030 sollen fünf paneuropäische Versorgungs- und Importkorridore mit über 30.000 Kilometer Leitungen entstehen, die Wasserstoffherzeuger und Häfen mit den großen Nachfragerregionen verbinden.

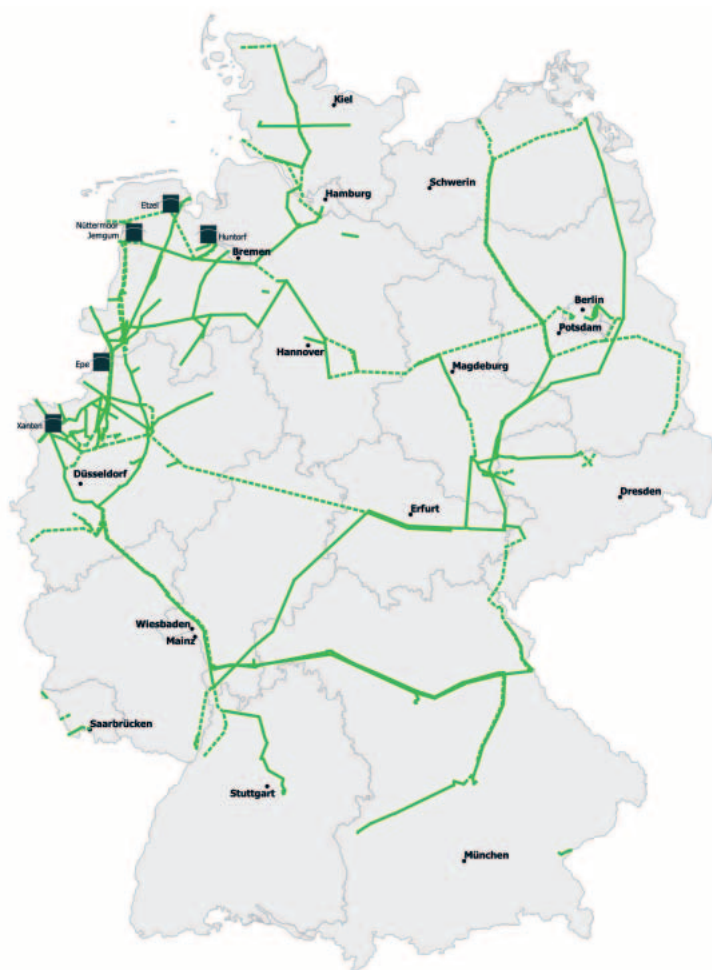
„Die bestehenden Erdgasnetze können für Wasserstoff genutzt werden.“

Stefan Griesheimer, Aliaxis Deutschland

Beim Wasserstoffnetz beginnen Europa und Deutschland nicht bei Null. Die bestehenden Erdgasnetze können Wasserstoff-Erdgas-Gemische und reinen Wasserstoff transportieren. Pilotprojekte zeigen, dass ein Gehalt von bis zu 35 Prozent H₂ im Gasgemisch weder für Rohre noch für Armaturen Probleme bereitet. Auch Kunststoffrohre sind wasserstofftauglich, wenn sie mit Permeationssperren aus Metall oder Polyamid abgedichtet werden. Derzeit untersucht der Branchenverband DVGW in einem Forschungsprojekt, wie gut sich solche Mehrschichtrohre verlegen und schweißen lassen.

Über weitere Strecken lässt sich Wasserstoff besonders effizient in chemisch gebundener Form transportieren, zum Beispiel als Molekülbestandteil von Methanol, Ammoniak oder bestimmten Wärmeträgerölen (LOHC). Besonderes Augenmerk gilt dabei dem Ammoniak (NH₃). NH₃ ist eine der weltweit am meisten produzierten Chemikalien, vor allem für Düngemittel. Infrastruktur und Handhabung der Chemikalie sind daher etabliert.

In Deutschland soll die Region Nordost um die Städte Rostock, Stralsund und Greifswald ein Hotspot für regenerativ erzeugten Ammoniak werden. Die Region verfügt zu Land und zu Wasser über eine große Windkraftkapazität. Die Idee: Mit dem Windstrom wird durch Elektrolyse grüner Wasserstoff erzeugt und mit Stickstoff zu Ammoniak umgesetzt. Der Ammoniak kann direkt in Motoren genutzt werden, beispielsweise für den Antrieb von Schiffen. Oder er wird nach dem Transport in speziellen Crackern zerlegt und der Wasserstoff wieder freigesetzt.



Wasserstoffleitungen
 — Umstellung
 - - - Neubau

Speicher
 ■ Kavernenspeicher





Die Technik für diese Prozesskette muss für den Großeinsatz freilich erst noch reifen. Das **Zentrum für Brennstoffzellentechnik (ZBT)** beispielsweise baut erste dezentral einsetzbare Synthesenanlagen und arbeitet gemeinsam mit Partnern an Tankstellen und Antrieben für NH_3 . In Rostock entsteht ein Technologiepark, in dem unter anderem Ammoniak-Cracker und Hochtemperaturelektrolyseure getestet werden.

„Chemische Träger für Wasserstoff erleben derzeit einen Boom.“

Ludolf Plass, Global Energy Solutions

Sicher ist, dass Ammoniak als Wasserstoffträger die Transportkapazität deutlich erhöht: Der derzeit weltweit größte Wasserstofftanker kann etwa 100 Tonnen H_2 aufnehmen, der größte Ammoniaktanker dagegen das Äquivalent von knapp 18.000 Tonnen H_2 . Noch ist regenerativ erzeugter Ammoniak mit über 650 Dollar pro Tonne teuer. Etwa ab 2027 könnten – beispielsweise aus geplanten Anlagen in Australien, Kasachstan und dem Oman – größere Mengen verfügbar sein, was zu sinkenden Preisen führen wird.

Auch weniger bekannte Chemikalien könnten als Wasserstoffträger Karriere machen. Die **Hydrogenious LOHC**

Technologies GmbH nutzt das schwer entflammable Trägeröl Benzyltoluol für Transporte über weite Distanzen. Der Wasserstoff wird zunächst chemisch an das Öl gebunden und das hydrierte Öl dann auf Schiff, Lkw oder Bahn geladen. Im Abnehmerland wird der Wasserstoff thermisch wieder freigesetzt und das Trägeröl für den nächsten Zyklus zurück zur Hydrierungsanlage gebracht. Hydrogenious hat gemeinsam mit Partnern mehrere Pilotprojekte in Deutschland und Schweden gestartet. Mit Abu Dhabi sind erste Schritte für eine Lieferung von bis zu 180.000 Tonnen H_2 pro Jahr vereinbart. Ein Vertrag mit dem Hafen Amsterdam sieht gar eine Importmenge von jährlich einer Million Tonnen H_2 vor.

„Eisen als Wasserstoffträger ist kostengünstig, leicht transportfähig, überall vorhanden und kohlenstofffrei.“

Andreas Dreizler, TU Darmstadt

Wasserstoff-Carrier können sogar fest sein. Sogenannte Metallhydride haben eine hohe Speicherdichte für H_2 und eignen sich als „Wasserstoffbatterie“ insbesondere für saisonale und lokale Speicher, für kleine lokale Netze und die Gebäudeversorgung. Das **Fraunhofer IWKS** testet

derzeit eine Titan-Eisen-Legierung, die relativ kostengünstig ist, eine hohe H₂-Kapazität hat und das Gas schon bei Temperaturen unter 100 Grad Celsius wieder freigibt.

Auch reine Eisenpartikel können mit Wasserstoff beladen werden. Da diese frei von Kohlenstoff sind, entsteht beim Hydrieren und Dehydrieren kein Treibhausgas. Das Startup **Ambartec AG** hat einen Speicher entwickelt, in dem Eisenoxid-Pellets mit Wasserstoff beladen werden. Dabei bildet sich elementares Eisen und heißer Wasserdampf, der beispielsweise für die Hochtemperaturelektrolyse direkt genutzt werden kann. Zum Entladen wird Dampf eingeleitet, der die Pellets wieder oxidiert und den Wasserstoff freisetzt.

Bis Wasserstoff und seine Träger in großen Mengen klimaneutral produziert werden, gehen noch Jahre ins Land. Die Zwischenzeit müssen konventionell hergestellte Chemikalien und Trägersubstanzen überbrücken, die entstehenden CO₂-Emissionen müssen aufgefangen und endgelagert oder anderweitig genutzt werden.

Auch dazu ist einiges in Bewegung. **Wintershall Dea AG** beispielsweise plant in Wilhelmshaven eine Anlage zur Sammlung von CO₂, um der Industrie Dekarbonisierungsmöglichkeiten anzubieten. Der Plan: Das CO₂ wird vor Ort komprimiert und mit Schiffen und Pipelines zu Lagerstätten vor der dänischen und norwegischen Küste gebracht. In Zukunft könnten deutsche Industriezentren per Pipeline mit Wilhelmshaven verbunden werden, um ihre Treibhausgasemissionen in die Endlagerung einzukoppeln.





H₂ - Die Sicherheit

Safety first!

Wasserstoff ist ein sehr mobiles, reaktives und explosives Gas, das der Mensch weder sehen noch riechen kann - diese „Unfassbarkeit“ hat eine Nutzung von Wasserstoff außerhalb der chemischen Industrie in der Vergangenheit immer wieder ausgebremst.

Jetzt aber steht sie vor der Tür, die Wasserstoffwirtschaft. Und sie wirft wichtige Sicherheitsfragen auf: Wie detektiert man Wasserstofflecks? Welche Methoden messen unerwünschte Wechselwirkungen mit Metallen und anderen Werkstoffen? Welche Materialien speichern und nutzen das Gas sicher?

„Materialtechnische Fragen sind entscheidend für die Wasserstoffwirtschaft.“

Jean-Francois Drillet, DECHEMA

Freie Wasserstoffmoleküle können Werkstoffe sowohl an der Oberfläche schädigen als auch tief in das Atomgitter von Metallen eindringen und damit Versprödung und Rissbildung verursachen. Diese Gefahr lauert schon am Anfang der Wertschöpfungskette: bei der Elektrolyse, mit der Wasserstoff hergestellt wird. Im Rahmen des Projekts DEGRAD-EL3 untersucht das **DECHEMA Forschungsinstitut** aus Frankfurt am Main mit weiteren Partnern die Degradationsmechanismen in verschiedenen Elektrolyseurtypen. Dabei werden Messmethoden entwickelt, die freien Wasserstoff von gebundenem unterscheiden, womit man seinen Einfluss auf Werkstoffe ableiten kann.

Ein zentrales Element von Elektrolyseuren und Brennstoffzellen ist die Bipolarplatte als Träger der beiden Pole. Sie muss chemisch hochbeständige Oberflächen haben und zugleich große Leitfähigkeiten aufweisen. Die **Schaeffler AG** aus Herzogenaurach entwickelte eine Platte, die dank anderer Legierungselemente und spezieller Beschichtung diese hohen Anforderungen erfüllt. Der besonders dünne und kompakte Aufbau hat laut Unternehmen zudem einen um 60 Prozent kleineren CO₂-Fußabdruck als herkömmliche Platten für PEM-Brennstoffzellen.

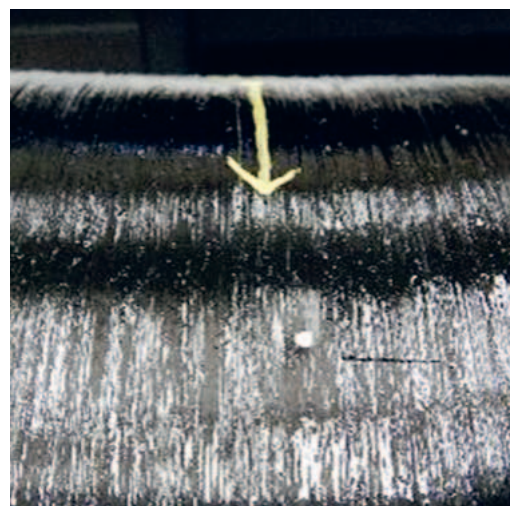
Auch Drucktanks, die für Brennstoffzellenfahrzeuge gebraucht werden, müssen hohe Anforderungen erfüllen. Sie sollen leicht sein und stabil, zugleich druck- und diffu-

sionsfest. Hochdrucktanks bestehen aus bis zu 50 Lagen speziell gewickelter Fasern, die in eine Matrix eingebettet sind. Problem: Schäden im Material sind von außen unsichtbar. Daher arbeiten Partner aus Forschung und Industrie im Projekt Hymon derzeit an einer On-Board-Strukturüberwachung für Fahrzeugtanks aus Faserverbundwerkstoffen. Die Überwachung erfolgt unter anderem durch winzige, in die Wicklungen integrierte Dehnungssensoren, die bei Rissen oder Materialermüdung Alarm geben.

„Schäden an Hochdrucktanks sind von außen unsichtbar.“

Julia Decker, Fraunhofer LBF

Sicherheit und Lebensdauer von Hochdrucktanks hängen entscheidend von der Präzision der Faserwicklungen ab. Deren Eigenschaften zu bewerten, ist aufwändig und knifflig. Beispielweise unterscheiden sich Steifigkeit und Festigkeit in Längs- und Querrichtung deutlich. Wenn eine Wicklung nur ein klein wenig vom optimalen Faserwinkel abweicht, verliert das Material rapide an Belastbarkeit. Die **MeFeX GmbH** aus dem hessischen Weiterstadt bietet daher Softwaretools an, die Faserschichten und Kreuzungsmuster präzise berechnen, womit sich die Auslegung der Hochdruckbehälter optimieren lässt.





Eine Wasserstoffwirtschaft ist auf weiten Strecken eine Stahlwirtschaft – beim Transport genauso wie im Automobil. Wie H₂-verträglich sind aber eigentlich Stähle? Diese Frage beschäftigt derzeit viele Materialprüfer und Automobilzulieferer. Beim Stahl für Brennstoffzellen, so haben Versuche bei der **Robert Bosch GmbH** gezeigt, kommt es auf die Modifikation des Eisens an. Die verschiedenen Kristallstrukturen des Eisens reagieren auf Temperatur und zyklische Belastung (beispielsweise durch das Betanken) unterschiedlich und zeigen Abweichungen in der Dauerfestigkeit.

„Es gibt keine eindeutige Festigkeitsgrenze für Stähle.“

*Professor Matthias Oechsner,
Materialprüfungsanstalt der TU Darmstadt*

Selbst hochfeste Stähle sind nicht gegen H₂ gefeit. Unter Wasserstoffeinfluss beschleunigt sich die sogenannte Spannungsrisskorrosion – das Material bricht schneller.

Dahinter stecken zwei mögliche Mechanismen: Wasserstoff sammelt sich an Achsen höchster Spannungskonzentration und senkt die Bindungsenergie im Gefüge. Zudem beeinflussen H₂-Moleküle Versetzungen im Werkstoff. Diese Versetzungen geraten dadurch leichter in Bewegung, was zu Mikrorissen und Schäden führen kann.

Da es bei Stählen keinen kritischen H₂-Gehalt und keine eindeutige Festigkeitsgrenze gibt, braucht es für eine maximale Zuverlässigkeit der eingesetzten Werkstoffe experimentelle Untersuchungen und mikrostrukturelle Analysen genauso wie wissenschaftliche Modellierungen. Durch das Zusammenspiel bekannter und neuer Ansätze können wasserstoffbedingte Ausfälle von Material und Bauteilen so weit wie möglich vermieden werden.

Für die Analyse der mechanischen Werkstoffeigenschaften gibt es drei verschiedene Methoden – die Prüfung in einem mit H₂ gefüllten Autoklaven, die Hohlprobentechnik, bei der eine Bohrung im Bauteil mit dem Gas gefüllt wird oder die Analyse einer Vollprobe, bei der das Material mit H₂ vorbeladen wird.

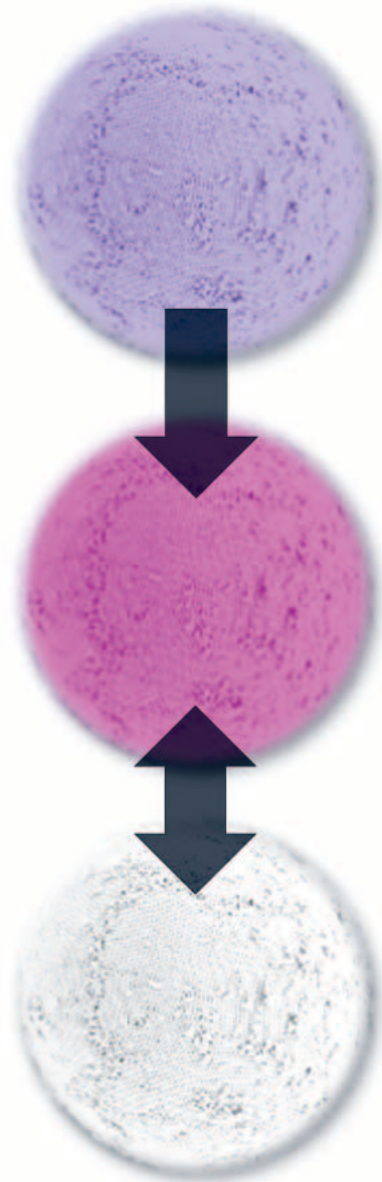
Alle drei haben Vor- und Nachteile. Die Autoklav-Methode ist etabliert und arbeitet mit standardisierten Proben. Am Druckwasserstoffprüfstand des **Fraunhofer LBF** untersuchen Forscher beispielsweise Pipeline-Stahl mit geringem Kohlenstoffgehalt mit der Autoklav-Methode. Dabei zeigt sich durch den Einfluss des Wasserstoffs eine Minderung der Lebensdauer insbesondere unter zyklischer Belastung des Werkstoffs. Die Hohlprobentechnik hat deutlich geringere Peripheriekosten und liefert schneller Ergebnisse, das haben Untersuchungen am **Fraunhofer IWM** gezeigt. Allerdings ist bei dieser Methode die Probengeometrie unterschiedlich, damit sind die Messergebnisse nur bedingt mit der Autoklav-Methode vergleichbar. Prüfungen mit gasgesättigten Proben sind ebenfalls deutlich günstiger, ergeben aber nur für austenitische Stähle Sinn, bei denen das Gas während der Messungen nicht herausdiffundiert.

„Unsere Wasserstoffampel kann Unfälle und Explosionen verhindern.“

Jakob Reichenstein, Universität Erlangen

Am sichersten fühlt sich der Mensch, wenn er eine Gefahr sehen kann. Doch das Gas Wasserstoff ist für das menschliche Auge unsichtbar, es reagiert dafür umso sensibler auf Farben. Daraus entstand im Department Chemie und Pharmazie der **Universität Erlangen** die Idee einer optischen Wasserstoffampel.

Den Indikator der Ampel bilden poröse Suprapartikel aus Nanobausteinen, mit denen Wasserstoff reagiert. Dadurch wechselt die Farbe des Materials von Lila nach Pink und von Pink zu Farblos. Verschwindet der Wasserstoff, werden die farblosen Partikel wieder pink, aber nicht mehr lila. Dadurch kann der Indikator Lecks in Echtzeit sichtbar machen, aber auch im Nachhinein präzise lokalisieren. Werden Additive dem Material zugemischt, kann die Ampel in vielen Bereichen eingesetzt werden, beispielsweise für die Beschichtung von Gasleitungen an Tankstellen.





H₂ - Einsatz für die Mobilität

Verkehr gibt Gas

Mobilität ist und bleibt ein Motor erfolgreichen Wirtschaftens – das gilt auch in Krisenzeiten. Hessen macht groß von sich reden, wenn es um klimafreundliche Mobilität geht: Im Taunus verkehrt beispielsweise die weltweit größte Brennstoffzellen-Zugflotte und die Betreiber des Frankfurter Flughafens machen sich intensiv Gedanken um den Einsatz von Wasserstoff in der Luftfahrt. Eine neue Potenzialanalyse zeigt, dass sich in Hessen der Wasserstoffbedarf zwischen 2030 und 2045 von 8.300 auf 30.000 Gigawattstunden (GWh) vervielfachen wird, der Mobilitätssektor beansprucht davon etwa ein Viertel.

Wichtig auf dem Weg zum Wasserstoff ist die regionale Verknüpfung von Quellen – den Herstellern und Importeuren – mit den Senken, also den unterschiedlichen Verbrauchern. In sogenannten HyPerformer-Regionen haben sich in Deutschland erste Wasserstoffnetzwerke, Infrastrukturen und Projekte etabliert. Dazu gehört auch die Region Rhein-Neckar, die im Rahmen des HyLand-Wettbewerbs des Bundesverkehrsministeriums zu einer Wasserstoff-Modellregion im Mobilitätssektor werden soll. Insgesamt gibt es in Hessen bislang fünf Regionen, in denen Verkehrsprojekte auf Wasserstoffbasis angestoßen wurden.

„Die Rhein-Main-Region könnte Europas größte Wasserstoffregion werden.“

David Coleman, Hynes GmbH

Viele Automobilhersteller sind mit neuen Antrieben auf dem Weg zur Serie. Zu den Herausforderungen bei Brennstoffzellenantrieben gehört derzeit noch eine ausreichend lange Lebensdauer der Brennstoffzellenstacks. Daneben sind die Kosten noch zu hoch. Ein Ansatz zur Kostensenkung liegt im Austausch der Edelmetalle in den Katalysatoren durch preiswertere Elemente.

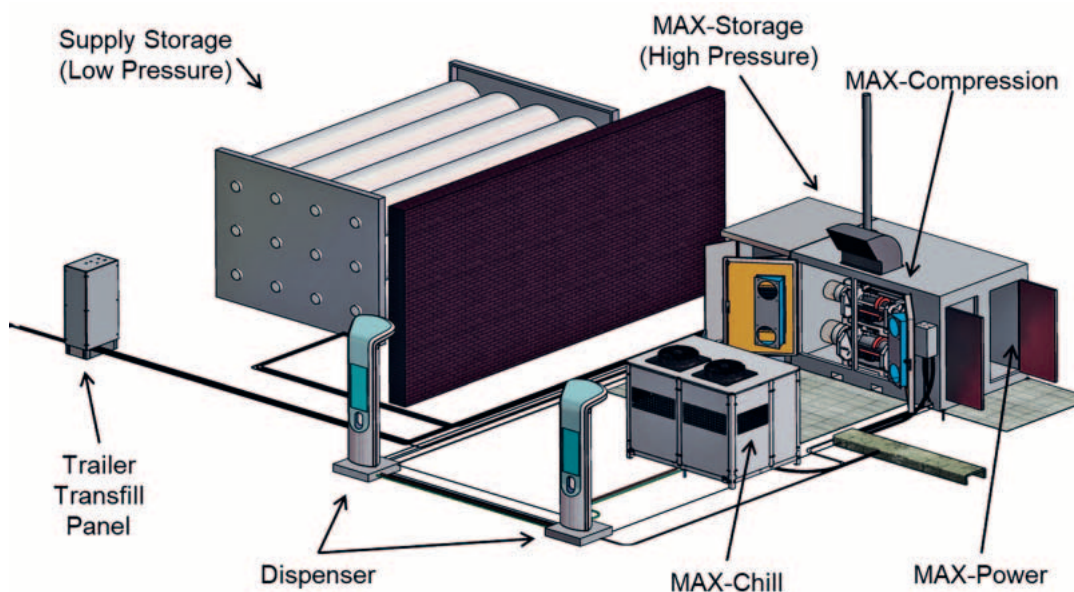
Auch technisch gibt es noch Hürden auf dem Weg in den Markt. Auf der Straße ist eine Brennstoffzelle – beispielsweise eingebaut in einen großen Lkw – ständig Vibrationen, wechselnden Temperaturen und Druckbelastungen ausgesetzt. Das Fraunhofer LBF testet Stacks daher möglichst realitätsnah im Labor und kann so die komplexen Belastungen auf langen Strecken abbilden. Das gelingt im LBF durch eine Kombination von Temperaturkammer und Fahrzeugenergiesimulator mit einem Schwingererger. Die Simultanmessungen erhöhen das Verständnis des Brennstoffzellenantriebs als Gesamtsystem und könnten seinen Weg in den Markt beschleunigen.

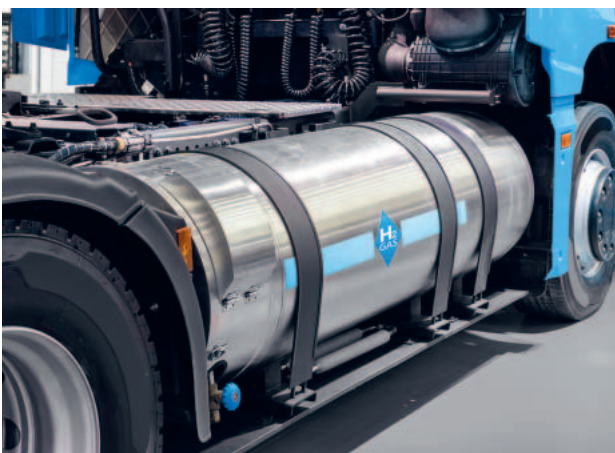
Viele Anfragen aus der Industrie richten sich derzeit auf eigentlich bewährte Werkstoffe, deren praktische Wasserstofftauglichkeit erst noch belegt werden muss. Daher plant das Zentrum für Konstruktionswerkstoffe der TU Darmstadt den Bau eines H₂-Hochtemperaturlabors. Es soll ab 2024 mit modernsten Prüfmaschinen untersuchen, wie heiße Materialien im Kontakt mit Wasserstoff reagieren, und entsprechende Kennwerte für Forschung und Industrie liefern.

„Wasserstofftankstellen sind so komplex wie eine Chemieanlage.“

Matthias Kurras,
Maximator Hydrogen GmbH

Praxisreif sind mittlerweile auch Wasserstofftankstellen – und das, obwohl die Anforderungen ähnlich umfangreich sind wie bei mancher Chemieanlage: Die Bauteile müssen hohe Drücke aushalten und dabei wasserstoffundurchlässig sein. Für die eingesetzten Verdichter gilt: höchste Leistung über alle Temperaturextreme. Das gesamte „System Tankstelle“ muss autonom arbeiten und salziger Seeluft an der Küste genauso standhalten wie dem Klima in Wüstenregionen.





Noch gibt es technische und logistische Fragen rund um einen zügigen Ausbau des Tankstellennetzes. Die notwendigen Werkstoffe sollen möglichst ohne CO₂-Emissionen produziert werden, außerdem regional verfügbar und leicht zu bearbeiten sein, um Zeit und Kosten zu sparen. Wichtig sind zudem ein modularer Aufbau und ein größenskalierbares Anlagenkonzept. Die gute Nachricht: Die spezifischen Betriebskosten eines wasserstoffbetriebenen Lkw liegen nach Angaben des Tankstellenlieferanten **Maximator Hydrogen GmbH** pro Tonnenkilometer inzwischen nur noch um den Faktor 1,26 höher als beim Diesel-Lkw. Eine Kostenparität rückt in greifbare Nähe.

Anders als am Boden ist für die Luftfahrt der Umstieg auf Wasserstoff so etwas wie ein Neustart. Da Kryotanks und Drucktanks um den Faktor vier bis neun größer sind als Kerosintanks, müssen Flugzeugbauer ihre von Wasserstoff angetriebenen Maschinen anders konstruieren. Zudem müssen die Terminals angepasst werden und große Tankstellen vorhanden sein. Eventuell müssen die Airlines auch Tankmanagement und Flugbetrieb verändern: Ein mit Wasserstoff betanktes Flugzeug muss ohne große Verzögerung abheben, da dieser Treibstoff in den Tanks sonst in den gasförmigen Zustand übergeht (sogenanntes Boil-off).



Trotz vieler offener Fragen arbeitet die Luftfahrtindustrie an ersten Flugzeugen für Wasserstoff. Airbus will bereits bis 2035 einen Jet mit H₂-Turbine entwickeln. Andere setzen auf die Brennstoffzelle vor allem für kleinere Propellerflieger, denn Brennstoffzellen sind in der Luftfahrt schon etwas bekannter und erprobter als H₂-Turbinen. Das **Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt** beispielsweise plant, dass spätestens im Jahr 2040 ein 70-Sitzer mit Brennstoffzellen für Entfernungen bis zu 2.000 Kilometer in die Luft geht.

„Wasserstoff in der Luftfahrt verändert alles: Flugzeuge, Terminals und Flugbetrieb.“

Leonie Lauer, Kompetenzzentrum für Klima- und Lärmschutz im Luftverkehr (CENA)/ Hessen Trade & Invest GmbH

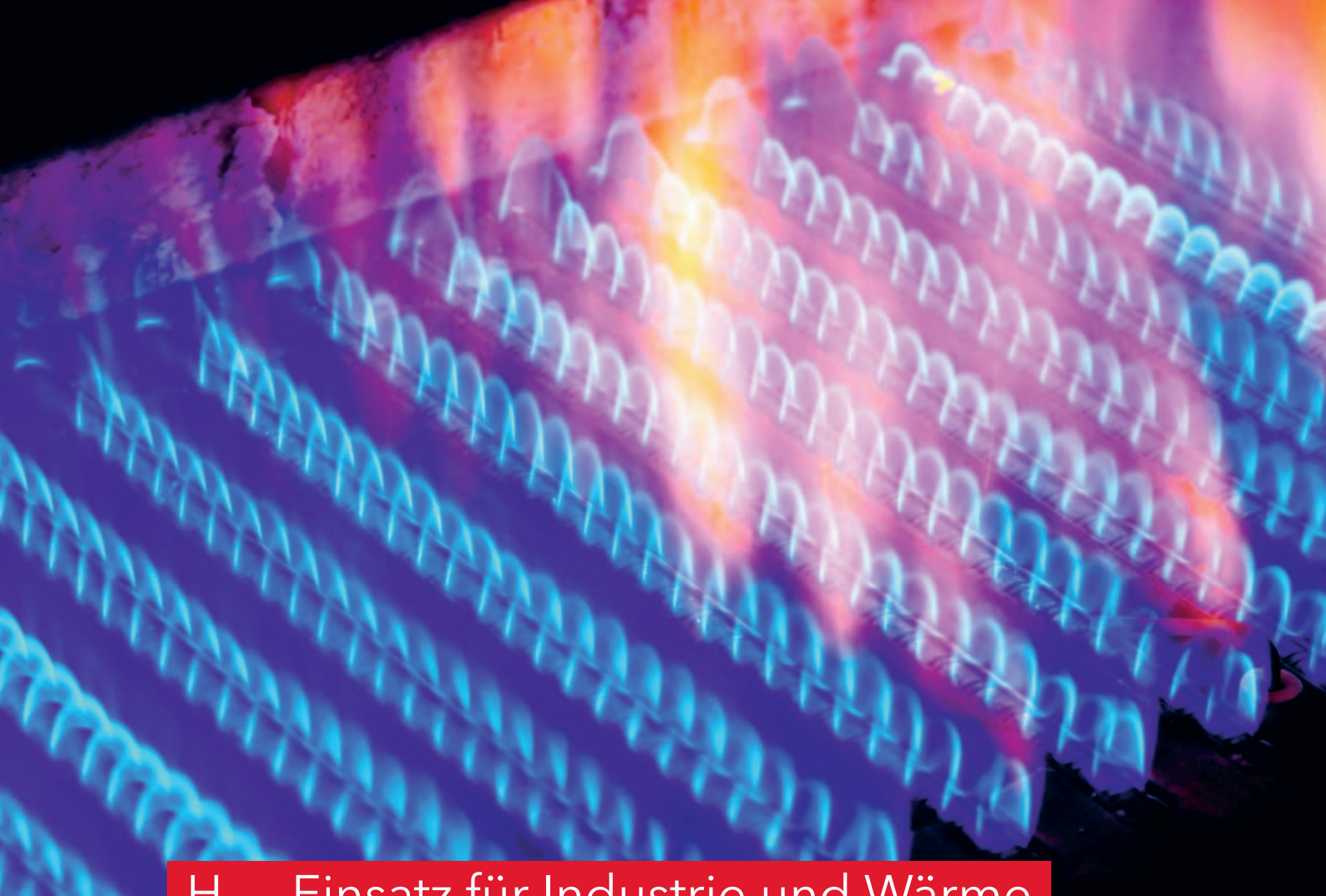
Wie Flugzeuge brauchen auch Schiffe für diesen neuen Treibstoff weitaus größere Tanks. Zwar könnten Kreuzfahrtschiffe oder Frachter künftig anstelle von Wasserstoff mit wasserstoffhaltigen Chemikalien wie Methanol und Ammoniak angetrieben werden. Beide Stoffe erzeugen allerdings bei der Verbrennung im Motor schädliche Emissionen: Aus Ammoniak entstehen Stickoxide und Lachgas, aus Methanol Kohlenmonoxid und Formaldehyd. Ihr großer Vorteil ist hingegen, dass sie weltweit in großen Mengen zur Verfügung stehen und effizienter als Wasserstoff zum Kunden transportiert werden können.

Südkorea, ein enger wirtschaftlicher Partner Hessens, lässt sich von den offenen Fragen nicht schrecken. Die von Staat und Wirtschaft ins Leben gerufene Dachorganisation **H2Korea** will das kleine Land an die Spitze der globalen Wasserstoffindustrie bringen. Bis 2040 sollen über sechs Millionen Brennstoffzellenfahrzeuge auf Südkoreas Straßen unterwegs sein, Wasserstoff soll künftig Schiffe, Großmaschinen, Drohnen und Flugzeuge antreiben. Das Land investiert massiv in den Ausbau von Pipelines, Tankstellen und die Etablierung von technischen Standards. Südkoreanische Großkonzerne – die **SK Group**, **Hyundai**, der Stahlriese **Posco** – stellen Milliarden für die Wasserstoffwirtschaft bereit.

„Von der strategischen Ausrichtung Südkoreas können wir viel lernen.“

Sandro Szabó, Technologieland Hessen/ Hessen Trade & Invest GmbH

Auch in Hessen sind viele südkoreanische Unternehmen mit ihrer hohen Kompetenz im Bereich Wasserstoff aktiv. Daher luden im Juni 2022 **Materials Valley e.V.** und **KOTRA**, die offizielle Investitionsförderungsagentur der koreanischen Regierung, zu einem Workshop ein, auf dem Unternehmen und Forschungsinstitute beider Länder Produkte und Innovationen vorstellten. Die strategische Ausrichtung Südkoreas hin zur Wasserstoffwirtschaft ist Vorbild für andere Nationen, die ähnlich ambitioniert in Richtung klimaverträgliche Mobilität Gas geben wollen.



H₂ - Einsatz für Industrie und Wärme

Betriebe und Versorger setzen an zur Wende

Die postfossile Energieversorgung von Betrieben und Gebäuden ist ein gigantisches Vorhaben. Ungezählte Maschinen, Kessel, Trockner, Dampferzeuger, Schmelzwannen und Industrieöfen, aber auch zwei Millionen Nicht-Wohngebäude und 19 Millionen Ein- und Mehrfamilienhäuser müssen umrüsten - auf erneuerbare Energien, auf Fernwärme, auf Wasserstoff.

Insbesondere im Gebäudesektor hat dieses Wendemanöver einen großen Radius. 2020 wurden noch über 80 Prozent der Heizungswärme fossil erzeugt, nur 18 Prozent entfielen auf erneuerbare Energien. Der Umstieg auf Wasserstoff ist für kommunale Wärme- und Kraftwerksplaner noch eine Rechnung mit vielen Unbekannten: Infrastruktur, Energieträger und Verbrauch müssen aufeinander abgestimmt werden.



Hilfreich für alle Akteure sind die Fortschritte, die innerhalb recht kurzer Zeit in der Brennertechnik erzielt wurden. Es gibt mittlerweile für viele Anwendungen einsatzbereite Wasserstoffbrenner – für die kleinere Therme genauso wie für großindustrielle Dampferzeuger. In vielen Fällen werden sogenannte bivalente Systeme installiert – Brenner mit zwei separaten Düsen und getrennten Gaszuführungen, die sowohl Erdgas als auch Wasserstoff und Gas-H₂-Gemische verfeuern können.

„Derzeit fehlt schlicht der Wasserstoff, um unsere Schmelzwannen schneller umzustellen.“

Stefan Knoche, Schott AG

Die Glasindustrie benötigt hohe Energiemengen vor allem für ihre Schmelzwannen. Die Mainzer **Schott AG** hat in einer Technikumsanlage probeweise verschiedene Gläser mit H₂ und Erdgas-H₂-Mischungen erschmolzen und dabei gute Ergebnisse erzielt. Zwar ist der Wassergehalt im neuen Glas höher, weil die Schmelze beim Einsatz von H₂-haltigem Brenngas einer Wasserdampfatmosphäre ausgesetzt ist. Dass sich dadurch kritische Eigenschaften des Werkstoffs verändern, hat der Hersteller bisher nicht

festgestellt. Im Sommer 2023 will Schott das erste klimaneutrale Spezialglas für Teleskoplinsen und Spiegel liefern. Der Wermutstropfen für die Entwickler: Für Langzeitversuche fehlt schlicht der Wasserstoff.

Nicht abwarten, sondern handeln wollen auch Papierhersteller. Die **Essity Germany GmbH** hat am Standort im hessischen Mainz-Kostheim die erste von vier Papiermaschinen auf Wasserstoff umgestellt. Dafür wurden unter anderem neue Brenner installiert, eine Entladestation für Trailer und eine Mischstation eingerichtet. Im Februar 2023 produzierte Essity das erste Papier aus CO₂-freier Produktion.

„Unser CO₂-frei produziertes Papier ist ein klarer Wettbewerbsvorteil.“

Thorsten Bucherer, Essity Germany GmbH

Guter Rat ist besonders teuer in der Zementindustrie, wo große Mengen CO₂ als unvermeidbares Nebenprodukt der Zementherstellung entstehen. Im Verbundprojekt CO₂-Syn beschreibt die **Ruhr-Universität Bochum** mit dem **Fraunhofer-Institut UMSICHT** und der **RWTH Aachen** einen neuen Weg, um die Emissionen der Branche zu



senken. Statt das Klimagas abzuscheiden und weit weg vom Erzeugungsort einzulagern, wollen sie das CO₂ aus der Zementproduktion gemeinsam mit Wasser über eine Co-Elektrolyse mithilfe besonders robuster Katalysatoren in Kohlenmonoxid und Wasserstoff umsetzen. Aus diesem Synthesegas können durch Thermokatalyse chemische Produkte wie Olefine und Alkohole produziert werden. Derzeit wird die Elektrolyse von Laborgöße auf einen 50-Kilowatt-Stack skaliert. Bis 2026 wollen die Entwickler eine gesamte Prozesskette im Pilotmaßstab auf die Beine stellen.

Gigantische Vorhaben wie die Wärmewende machen es erforderlich, in großen Dimensionen zu denken. Dem Motto „Think big!“ folgt beispielsweise die Hydrogen Roadmap des Schwerindustriekonzerns **Kawasaki**. Dabei überlassen die Japaner wenig dem Zufall und entwickeln nahezu alle Glieder der Wertschöpfungskette selbst – angefangen von der Wasserstoffherzeugung (derzeit noch aus Braunkohle) über die Verflüssigung und den Transport mit eigenen Schiffen und Trailern bis hin zu Brennkammern und Turbinen. Gemeinsam mit RWE will Kawasaki bis 2025 eine Gasturbine mit 34 Megawatt Leistung im Kraftwerk Lingen installieren, die dann ausschließlich mit grünem Wasserstoff betrieben wird.

Von Nachhaltigkeitskriterien für den Import von grünem Wasserstoff über eine effiziente Dekarbonisierung des Wärmesektors bis hin zur Wasserstoffspeicher-Roadmap – der Nationale Wasserstoffrat hat seit seiner Gründung 2020 viele Aspekte einer Wasserstoffwirtschaft ausgeleuchtet. Für die Industrie von dringlichem Interesse sind die Gutachten und Stellungnahmen zu den Themen Markthochlauf und Wettbewerbsfähigkeit.

„Die USA könnten zum wirtschaftlichsten Hersteller von grünem Wasserstoff werden.“

Martin Roßmann, Viessmann SE

Laut Wasserstoffrat könnten die USA bald zum weltweit wirtschaftlichsten Hersteller von grünem Wasserstoff werden. Gemäß dem Inflation Reduction Act (IRA) werden in den USA tätigen Unternehmen Steuergutschriften gewährt. Dadurch sinken die Gestehungskosten vor allem von Solar- und Windstrom, was den Betrieb von Elektrolyseanlagen deutlich günstiger macht. Die Erzeugungskosten von grünem Wasserstoff könnten in den USA bald bei ein bis zwei US-Dollar pro Kilogramm liegen, europäische Hersteller rechnen dagegen mit Kosten von drei bis vier US-Dollar pro Kilogramm bis 2030.

Der Kostenwettbewerb um den Wärmeträger der Zukunft hat begonnen. Andreas Brumby, Vorstandsmitglied des **Materials Valley e.V.**, ist überzeugt: „Mit guter Planung, den richtigen Anreizen und nicht zuletzt mit innovativen Materialien aus Hessen können alle davon profitieren.“



H₂ - Das Potenzial für Hessen

„Erfahrungen zu sammeln,
steht jetzt ganz oben.“



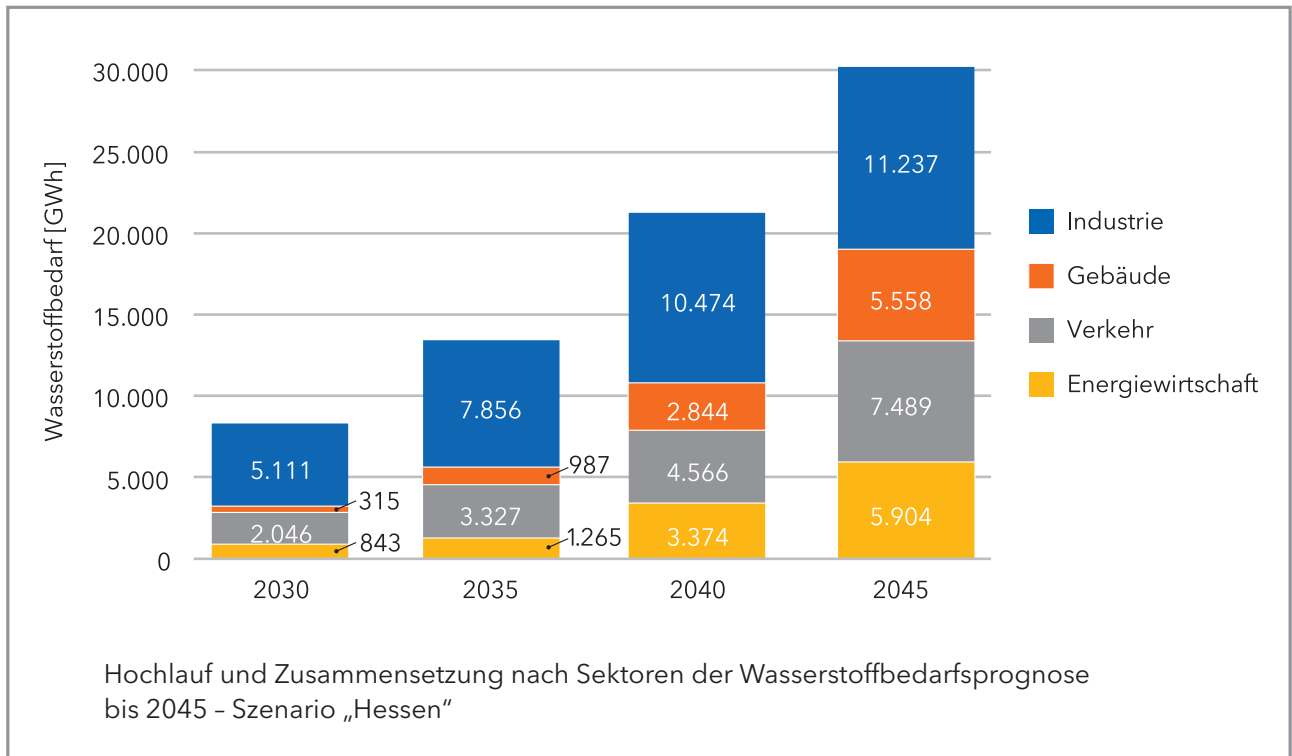
Oliver Eich hat Betriebswirtschaft und Geografie studiert und beschäftigt sich seit über zehn Jahren mit dem Thema Wasserstoff. Bei der LandesEnergie-Agentur Hessen GmbH ist er Projektleiter der Landesstelle Wasserstoff, die im Rahmen der hessischen Wasserstoffstrategie über Fördermöglichkeiten informiert und hessische Unternehmen und Kommunen bei der Umsetzung von Projekten und Geschäftsmodellen unterstützt. „Gas- und Energiekrise haben die Tür zur Wasserstoffwirtschaft weiter geöffnet“, betont Eich im Interview. Umso wichtiger ist es zu wissen, wie viel Wasserstoff bis wann durch welche Abnehmer gebraucht wird. Die hessische Potenzialanalyse vom Mai 2023 schärft den Blick.

Herr Eich, wie wasserstofffreundlich ist Hessen?

Wasserstoff beschäftigt uns in Hessen schon seit mehr als 20 Jahren. Bislang wurden über 100 Projekte gefördert - zur Erzeugung von Wasserstoff, zu Transport und Speicherung bis hin zu den unterschiedlichen Anwendungen. Für die Zukunft nennt die neue Wasserstoffstrategie des Hessischen Wirtschaftsministeriums drei Säulen: Flugverkehr und synthetische Kraftstoffe, Wasserstoffantriebe für Nutzfahrzeuge und außerdem die Schaffung von Rahmenbedingungen, die innovativen Produkten in den Markt helfen.

Wie viel Wasserstoff braucht Deutschland wann und wofür? Das ist derzeit die Eine-Million-Euro-Frage. Sie haben jetzt für Hessen den Bedarf analysiert.

Wir haben zehn Quellstudien renommierter deutscher Forschungsinstitute ausgewertet und auf dieser Basis Annahmen für Hessen generiert und verschiedene Szenarien abgeleitet. Das Bild, das sich daraus ergibt, ist ein zentraler Baustein für die Umsetzung der hessischen Wasserstoffstrategie. Den Bedarf auf Basis der Studienlage abzuschätzen, ist das eine. Zum anderen haben wir eine Umfrage gestartet, über die gewerbliche Verbraucher ihre konkreten Wasserstoffbedarfe mitteilen können. Das möchten wir nutzen, um die Planung der Wasserstoff-Infrastruktur zu unterstützen.



Die Datenlage zum deutschen Wasserstoffbedarf ist meist nicht sehr solide. Bestehende Prognosen variieren um den Faktor drei bis zehn.

Die Aussagen hängen wesentlich davon ab, wie viel die Autoren der Politik und den Unternehmen zutrauen. Erreichen die einzelnen Sektoren ihre Klimaschutzziele? Wie schnell gelingt die Transformation in Industrie, Verkehr und Energiewirtschaft? Da ist vieles noch unklar und in Bewegung. Das „Szenario Hessen“ in unserer Analyse bildet eine Kombination der verschiedenen Ambitionsniveaus ab. Um nah an die Wahrheit zu rücken, haben wir zusätzlich Experten aus Hochschulen und Industrie befragt und deren Einschätzung einfließen lassen. Dieses Feedback war sehr hilfreich.

Wie hat der Krieg gegen die Ukraine den Blick auf die Wasserstoffwirtschaft verändert?

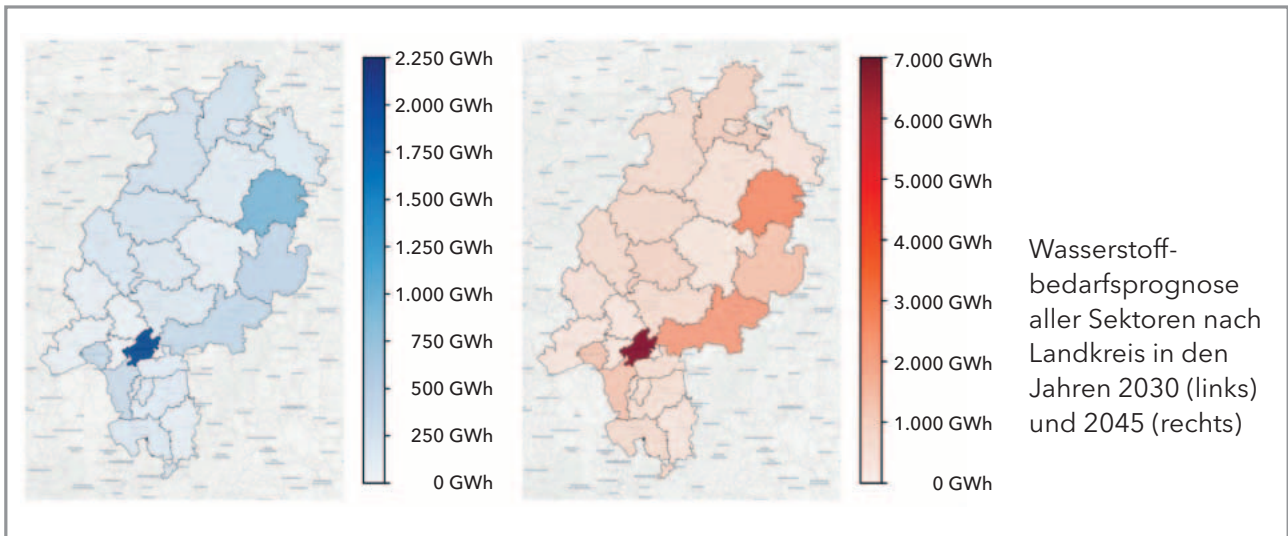
Die meisten Prognosen zum Wasserstoffbedarf in Deutschland entstanden vor dem Ukrainekrieg. Heute wären die Aussagen mancher Autoren wahrscheinlich ambitionierter. So gesehen haben Gas- und Energiekrise den Blick geschärft und die Tür zur Wasserstoffwirtschaft weiter geöffnet.

Welches sind die wesentlichen Aussagen Ihrer Potenzialanalyse für Hessen?

Überrascht hat mich die schiere Dimension des Bedarfs, der für Hessen klar in den Terawattbereich geht. Schon für das Jahr 2030 zeigt unsere Potenzialanalyse einen Bedarf von 8,3 Terawattstunden. Vor allem die Sektoren Verkehr und Industrie werden bis etwa 2035 die dominierenden Treiber sein. Die Industrie wird 2035 mehr als die Hälfte des gesamten Wasserstoffs benötigen, der Verkehr ein Viertel. Ab 2040 werden auch die Sektoren Gebäude und Energiewirtschaft spürbar werden. Im Jahr 2045 liegt der Gesamtbedarf für Hessen bei gut 30 Terawattstunden, davon 11 für die Industrie, 7,5 für den Verkehr, 6 für die Energiewirtschaft, 5,5 für die Gebäudewirtschaft.

Und beim Blick auf die Regionen?

Einen Hotspot bildet natürlich der Raum Frankfurt mit seinem Großflughafen und der Chemieindustrie. Aber auch im Main-Kinzig-Kreis und um Bad Hersfeld in Osthessen gibt es Schwerpunkte, da sich auch hier Unternehmen konzentrieren, die erhebliches Potenzial für die Anwendung von Wasserstoff haben.



Im Sektor Industrie entfallen im Jahr 2045 etwa 64 Prozent des Wasserstoffbedarfs auf die hessische Chemie. Ist das für die Transformation eher eine gute oder eine schlechte Nachricht?

Die Chemieindustrie nutzt Wasserstoff nicht nur energetisch, sondern auch stofflich. Daher kann sie sich zu einem Zugpferd entwickeln, von ihrer Initiative können auch andere profitieren. Leitungen und Versorgungsstrukturen werden ja nicht nur für einen Abnehmer gebaut, sondern für viele. Chemiestandorte wirken dann wie ein großer Ankerkunde, an den auch kleinere Wasserstoffverbraucher ankoppeln können.

Ein Ankerkunde ist auch der Frankfurter Flughafen. Bestimmt er, wie schnell die Transformation im Verkehrssektor gelingt?

Tatsächlich legen wir in unserer Analyse einen Fokus auf den Luftverkehr, der in vielen bundesweiten Prognosen und in anderen Bundesländern keine so große Rolle spielt. Hilfreich war insbesondere die Expertise der CENA, des landeseigenen Kompetenzzentrums für Klimaschutz im Luftverkehr, das bei Hessen Trade & Invest angesiedelt ist. Klar ist: Die Transformation im Luftverkehr ist ein dickes Brett und bedeutet quasi einen Neustart. Wasserstoff erfordert nicht nur neue Flugzeugdesigns aufgrund deutlich größerer Tanks, sondern auch ausreichend große Tankstellen - verbunden eventuell mit dem Bau von Verflüssigungsanlagen. Sogar das Tankmanagement und der Flugbetrieb müssen entsprechend verändert werden.

Wie weit ist man bei der Entwicklung von klimaverträglichen E-Fuels für Flugzeuge?

E-Fuels sind teuer und Wirtschaftlichkeit ist nun mal auch künftig ein entscheidender Faktor. Im Industriepark Hoechst war im April Baubeginn für eine Pilotanlage zur Erzeugung von E-Fuels im industriellen Maßstab. Zusätzlich hat das CENA das Begleitprojekt RePoSe gestartet. Es untersucht die Herstellung von E-Fuels über die Fischer-Tropsch-Synthese. Diese Synthese ist altbekannt. Neu ist aber, dass das Projekt erstmals eine variable Herstellung von grünem Wasserstoff bei Schwankungen der Stromversorgung erprobt. Da Strom aus Sonne und Wind nicht kontinuierlich zur Verfügung steht, werden als Puffer Wasserstoffspeicher benötigt. Wie groß diese genau sein müssen, wird berechnet und praktisch erprobt. Das ist weltweit bisher einmalig.

Wie weit ist die hessische Industrie generell in der Transformation?

Der Krieg in der Ukraine macht den Unternehmen deutlich, dass die Zeit von billigem Gas vorbei ist. Das befeuert die Wasserstoffwirtschaft. Aber anders als im Straßenverkehr, wo es bereits Fahrzeuge und Tankstelleninfrastruktur gibt, fängt die Industrie gerade erst an, nach Alternativen und neuen Prozessen zu suchen. Erschwerend kommt hinzu, dass jedes Unternehmen andere Anforderungen hat. Lösungen von der Stange wird es erst einmal kaum geben.

Für den Gebäudesektor gibt es gute Argumente für Wasserstoff und gute dagegen. Was ist Ihre Einschätzung?

In diesem Sektor sind zuverlässige Prognosen am schwersten zu treffen. Auch in unseren Gesprächen mit Expertinnen und Experten gingen die Einschätzungen weit auseinander. Mein Eindruck ist, dass die Transformation in großen Städten wie Frankfurt und Wiesbaden ohne Wasserstoff kaum gelingen kann. Die Netze sind schlicht nicht dafür ausgelegt, die Wärme- und Energieversorgung überall auf Strom umzustellen. Für die Versorgung von Altbau-Quartieren beispielsweise wird daher Wasserstoff eine Rolle spielen. In ländlich geprägten Regionen sehe ich die Notwendigkeit einer lokal differenzierten Betrachtung. So kann zum Beispiel das Vorhandensein industrieller Ankerkunden den Einsatz von Wasserstoff auch in der Gebäudewärme positiv beeinflussen. Die kommunale Wärmeplanung spielt hier ebenfalls eine wichtige Rolle.

Wie viel Wasserstoff kann Hessen künftig selbst herstellen?

Hessen war schon immer ein Energie-Importland, das wird auch in einer Wasserstoffwirtschaft so sein. Es gibt aber durchaus Unternehmen, die heute schon den Einsatz von Wasserstoff vorbereiten und ihn künftig auch über eigene Elektrolyseanlagen herstellen wollen. Insgesamt ist die Liste der laufenden oder geplanten Elektrolyseure in Hessen bislang aber eher kurz und umfasst etwa 20 Megawatt Leistung. Wir erwarten hier aber weiteren Zuwachs, analog zu der Entwicklung bundesweit. Ob und wie viele Unternehmen Wasserstoff künftig dezentral selbst produzieren, hängt einerseits wesentlich vom Preis des importierten Wasserstoffs ab, andererseits vom Bau der notwendigen Pipelines und Leitungen. Das sind aber keine Entscheidungen eines einzelnen Bundeslandes, das wird in Berlin und Brüssel entschieden.

Wie geht es nach der Potenzialanalyse weiter?

Wir haben im Rahmen unserer Potenzialanalyse eine Wasserstoffbedarfsabfrage gestartet. Hier können Unternehmen ihren Bedarf anmelden. Auch, um ein Signal in Richtung Versorger und Politik zu senden. Daneben hat das Thema Netzinfrastruktur für uns eine hohe Priorität: Wie kommt der Wasserstoff von den großen Versorgern in die Fläche? 2022 haben wir gemeinsam mit Netzbetreibern eine Verteilnetzstudie für das Rhein-Main-Gebiet erstellt, eine ähnliche Untersuchung werden wir noch in diesem Jahr für Nord- und Mittelhessen anstoßen.

Warum sind Netze so entscheidend?

Die Transformation gelingt nicht, wenn das Gesamtsystem Lücken hat. Die zentrale Frage lautet, wie man große Leitungen, kleinere Verteilernetze und lokale Elektrolyseure zu einem sinnvollen Ganzen bündelt. Dazu gehört herauszufinden, welche bestehenden Leitungen auch für Wasserstoff genutzt werden können und wo neu gebaut werden muss. Wir führen außerdem eine Studie zum Elektrolysepotenzial in Hessen durch, die bis Ende 2023 vorliegen soll. Hier untersuchen wir, wo vorteilhafte Standorte, am besten in Kombination mit PV und Windflächen, vorhanden sind. Oder wo Kopplungspunkte zum Stromnetz liegen. Und eben, wie teuer hessischer Wasserstoff wäre.

Das sind noch sehr viele, offene Fragen ...

... die sich Versorger und künftige Wasserstoffkunden aber stellen und stellen müssen. Daher ist es für uns als Landesstelle Wasserstoff ganz wesentlich, dass wir neue Projekte in der Industrie anstoßen. Erfahrungen in der praktischen Umsetzung zu sammeln, steht in den kommenden Jahren ganz oben: Was heißt das eigentlich für ein Unternehmen, wenn es auf Wasserstoff umstellt? Wie geht das und wo besteht Förderbedarf? Für den breiten Mittelstand in Hessen sind das Fragen, die über Wettbewerbsfähigkeit und Zukunftsfähigkeit entscheiden.

materials valley

Materials Valley e.V. wurde 2002 in Hanau mit dem Ziel gegründet, die Metropolregion FrankfurtRheinMain als Hightech-Standort für Materialforschung und Werkstofftechnologie zu profilieren und zu stärken.

Spätestens mit J. Rifkins „The Hydrogen Economy: The Creation of the Worldwide Energy Web and the Redistribution of Power on Earth“ 2002 wurde H₂ zum Thema. Er zeigte vorausschauend, dass die Lösung vielfältiger Werkstofffragen für die H₂-Wirtschaft notwendig ist - von Elektrokatalysatoren bis hin zu Sicherheit und Zuverlässigkeit von Materialien und Produktsystemen im H₂-Kontakt. Materials Valley begann bereits damals, sich in unterschiedlichen Gremien und Veranstaltungen mit materialbezogenen Fragestellungen rund um H₂ einzubringen - bis heute eine wichtige Aufgabe des Vereins.

Seit 2021 wurden mit dem Technologieland Hessen zwei Veranstaltungsreihen umgesetzt, um Materialinnovationen für ein klimaneutrales Europa bzw. für die H₂-Wirtschaft in ihrer vollen Breite zu zeigen - **Materials for the European Green Deal** und nun **Materials to RePower EU** - beide mit großartigem Erfolg.

Wie auch die nun vorliegende Broschüre zeigt, spielen von Materials-Valley-Partnern entwickelte und produzierte Materialien, Werkstoffe und Technologien weltweit eine entscheidende Rolle für die H₂-Wirtschaft. So sind in der Metropolregion schon seit weit über 100 Jahren führende Unternehmen der Edelmetallindustrie wie Heraeus und Umicore beheimatet, die mit kritischen Rohstoffen wie

Platin oder Iridium Elektrokatalysatoren für Brennstoffzellen und Elektrolyseure entwickeln, im industriellen Maßstab produzieren und weltweit vertreiben. Neben weiteren materialtechnologischen Spezialentwicklungen werden zunehmend auch maßgeschneiderte Recyclinglösungen entwickelt, um diese wertvollen Rohstoffe im Kreislauf zu halten. Weiterhin ist De Nora ein führender Anbieter von Elektroden für die alkalische Elektrolyse, Evonik entwickelt Membranen und Kunststoffe, die für die H₂-Wirtschaft unerlässlich sind, SCHOTT zeigt beispielhaft, wie H₂ Erdgas ersetzen kann. Die TU Darmstadt betreibt grundlegende Material- und Prozessforschung zum H₂-Kontext, die Fraunhofer-Institute LBF, IWKS und ISC forschen anwendungsorientiert zur Zuverlässigkeit, Kreislauffähigkeit und Materialentwicklung H₂-beauftragter Materialien und seit 2022 betreiben Fraunhofer LBF und IWKS mit Partnern das **Leistungszentrum-Wasserstoff Hessen GreenMat4H2**. Als wesentlich für den weiteren Ausbau der H₂-Wirtschaft betrachten alle Partner die Stärkung materialtechnischer Lösungen für eine erfolgreiche Transformation in die moderne Wasserstoffwirtschaft.

Professor Tobias Melz, Vorsitzender von Materials Valley: „Als Materials Valley freuen wir uns über die gute Zusammenarbeit im Technologieland Hessen. Wie ein Katalysator vernetzen und unterstreichen wir Kompetenzen, die für ein schnelles Gelingen des notwendigen Hochlaufes der H₂-Wirtschaft essenziell sind. Nicht zuletzt auch, damit Hessen eine führende Rolle in diesem Zukunftsfeld einnehmen kann.“



Prof. Dr.-Ing. Tobias Melz
Materials Valley
und Fraunhofer LBF



Dr. Philipp Walter
Materials Valley
und Heraeus



Dr.-Ing. Christiane Bucher
Materials Valley
und Fraunhofer LBF



Andreas Brumby
Materials Valley

Technologieland Hessen

Informieren, beraten, vernetzen: Das **Technologieland Hessen** unterstützt Unternehmen dabei, zukunftsweisende Innovationen zu entwickeln. Wir entfalten wirtschaftliche Potenziale, machen technologische Spitzenleistungen sichtbar und profilieren damit Hessen als Technologie- und Innovationsstandort. Umgesetzt wird das Technologieland Hessen von der Hessen Trade & Invest GmbH im Auftrag des Hessischen Wirtschaftsministeriums.

Unsere Angebote umfassen:

- Vernetzung von Akteuren, Kooperationsvermittlung
- Fach- und Informationsveranstaltungen
- Themenspezifische Publikationen
- Newsletter und Magazin „Technologieland Hessen“
- Beratung und Förderung
- Messebeteiligungen und Außenwirtschaftsförderung

Um mit den aktuellen technologischen und gesellschaftlichen Entwicklungen Schritt zu halten, ist es wichtig, sowohl einzelne Technologien im Auge zu behalten als auch Synergien zu erkennen. In fachspezifischen Innovationsfeldern bildet das Technologieland Hessen deshalb unterschiedliche Schwerpunkte ab.

Im **Innovationsfeld Materialtechnologien** unterstützen wir die hessischen Akteure bei der Entwicklung, Fertigung und Anwendung innovativer Materialien. Dabei legen wir besonderen Fokus auf Nachhaltige Materialien, Funktionsmaterialien und neue Fertigungsverfahren. Egal ob durch Materialdesign mit ungeahnten Eigenschaften und Funktionen oder innovativen Fertigungsverfahren: Materialtechnologien beflügeln auf vielerlei Wegen die Leistungsfähigkeit einer wettbewerbsfähigen Wirtschaft, die Klima, Ressourcen, Mensch und Umwelt schont. Um diesen Wandel in unserer Wirtschaft, Forschung und Gesellschaft zu unterstützen, begleiten wir aktuelle Trends und sind zentraler Ansprechpartner für Entwickler, Treiber und Anwender der innovativen Materialtechnologien. Nutzen Sie unsere Angebote und bringen Sie sich mit Ihren eigenen Ideen ein. Wir freuen uns auf den Dialog mit Ihnen!

Ihre Ansprechpartner im Technologieland Hessen, Innovationsfeld Materialtechnologien:



Dr. Sandro Szabó, Projektleiter
Telefon: +49 611 95017-8631
sandro.szabo@htai.de



Simon Schneider, Projektmanager
Telefon: +49 611 95017-8634
simon.schneider@htai.de



HESSEN
TRADE & INVEST

Wirtschaftsförderer für Hessen

Hessen Trade & Invest GmbH
Konradinerallee 9
65189 Wiesbaden

www.htai.de
www.technologieland-hessen.de

Impressum

Auftraggeber

Hessisches Ministerium für Wirtschaft,
Energie, Verkehr und Wohnen
Kaiser-Friedrich-Ring 75, 65185 Wiesbaden
www.wirtschaft.hessen.de

Herausgeberin

Hessen Trade & Invest GmbH
Technologieland Hessen
Konradinerallee 9, 65189 Wiesbaden
Telefon: +49 611 95017-85
E-Mail: info@htai.de
info@technologieland-hessen.de
www.htai.de
www.technologieland-hessen.de

In Kooperation mit

Materials Valley e. V.
c/o Heraeus Holding GmbH
Heraeusstraße 12-14, 63450 Hanau
Telefon: +49 6181 35-5268
E-Mail: judith.kuenssler@heraeus.com
www.materials-valley.de

Redaktion

Dr. Sandro Szabó, Hessen Trade & Invest GmbH
Simon Schneider, Hessen Trade & Invest GmbH
Andreas Brumby, Materials Valley e. V.
Dr. Thomas Niklas, Hessisches Ministerium für
Wirtschaft, Energie, Verkehr und Wohnen

Design & Realisierung

Theißen-Design
www.theissen-design.de

Konzept und Text

Dipl.-Ing. Christa Friedl
christa.friedl@web.de

Lektorat

Uta Marini
www.uta-marini.de

Veröffentlichungsdatum

Juli 2023

Druck

Print Pool GmbH
www.print-pool.com

Papier: Circleoffset Premium White
350 g/qm / 120 g/qm
Auflage: 500



print-pool.com

Umweltfreundlich gedruckt:
Klimaneutral produziert mit
Biodruckfarben und Recyclingpapier.



Dieses Druckerzeugnis wurde mit dem Blauen Engel ausgezeichnet



Bildnachweis

HTAI, Grafik bartels+drescher (Titelseite, Seite 5)
HMWEVW, Oliver Rütter (Seiten 2-3)
Global Energy Solutions e.V. (Seite 9)
FNB Gas e.V. (Seite 13 oben)
Wintershall Dea AG (Seite 15 unten rechts)
Hexagon AB (Seite 17)
FAU, Jakob Reichstein, et al., Adv. Funct. Mater.
2022, 32, 2112379. (Seite 19 oben)
LEA-Hessen, Jan Hosan (Seite 20)
Maximator Hydrogen GmbH (Seiten 21, 22 oben)
Infraserv GmbH & Co. Höchst KG (Seite 22 Mitte)
HTAI, Léonie Lauer (Seite 23)
Mainova AG (Seite 25)
Marc Wiebach, Tobias Renz Fair (Seite 28)

Adobe Stock/stock.adobe.com:
Grispb (Umschlagseite U2)
MP (Seiten 6-7)
AA+W (Seite 8)
rufous (Seite 10)
rukhmalev (Seite 11 oben)
master1305 (Seite 11 unten)
Viks_jin (Seite 12)
AA+W (Seite 13 unten)
Jon (Seite 14)
erika8213 (Seite 15 oben)
bht2000 (Seite 15 unten links)
chanjaok1 (Seite 16)
Wiski (Seite 18)
francescodemarco (Seite 19 unten)
scharfsinn86 (Seite 22 unten)
yevgeniy11 (Seite 24)
Sonate (Seite 26)
phonlamaipphoto (Seite 27 oben)
leungchopan (Seite 27 unten)
AA+W (Umschlagseite U3)

Vervielfältigung und Nachdruck – auch auszugsweise – nur nach vorheriger schriftlicher Genehmigung.

Diese Druckschrift wird im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit der Hessen Trade & Invest GmbH herausgegeben. Sie darf weder von Parteien noch von Wahlwerbenden oder Wahlhelfenden während eines Wahlkampfes zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für Bundestags-, Landtags- und Kommunalwahlen sowie Wahlen zum Europaparlament. Missbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlkampfveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist gleichfalls die Weitergabe an Dritte zum Zwecke der Wahlwerbung. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die Druckschrift nicht in einer Weise verwendet werden, die als Parteinahme der Landesregierung zugunsten einzelner, politischer Gruppen verstanden werden könnte. Die genannten Beschränkungen gelten unabhängig davon, wann, auf welchem Weg und in welcher Anzahl die Druckschrift den Adressaten zugegangen ist. Den Parteien ist es jedoch gestattet, die Druckschrift zur Unterrichtung ihrer eigenen Mitglieder zu verwenden.

Die Herausgeberin übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und die Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die in der Veröffentlichung geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit der Meinung der Herausgeberin übereinstimmen.



H₂
GREEN
HYDROGEN

HYDROGEN



Hessisches Ministerium
für Wirtschaft, Energie,
Verkehr und Wohnen

Projekträger:



HESSEN
TRADE & INVEST

Wirtschaftsförderer für Hessen

In Kooperation mit:

materials valley