

# Wasserstoff gegen den Klimawandel

ENERGIE  
MOBILITÄT  
UMWELT  
LOGISTIK  
FINANZEN

PARTNER DER WELT



# Pioniergeist aus Erlangen für einen Energieträger der Zukunft

Was hat Wasserstoff mit Erlangen zu tun? Und warum werden anscheinend ausgerechnet hier die Weichen für neue Antriebstechnologien mit Wasserstoff gestellt? Zwei, die es wissen, erklären, warum Erlangen bundesweit eine Führungsrolle in der Wasserstofftechnologie einnimmt: Prof. Dr. Siegfried Balleis, früherer Oberbürgermeister der Stadt Erlangen, und Jochen Steinbauer, Plattformerleiter für Wasserstoffzüge- und Technologien der Siemens Mobility GmbH

Als ehemaliger Mitarbeiter der Siemens AG im Bereich Verkehrstechnik ist Balleis gut mit den Schienenfahrzeugen von Siemens Mobility vertraut. Die Frage nach dem Grund seiner Affinität zu Wasserstoff beantwortet er mit einem Wort: „Fukushima“. Da es für die nach diesem Vorfall eingeläutete Energiewende jedoch an einer Expertenkommission fehlte, stellte er 2011 Antrag auf einen Arbeitskreis, dessen Leitung ihm auch übertragen wurde. Er war es auch, der die vom Helmholtz-Institut Erlangen-Nürnberg mitentwickelte LOHC-Technologie (Liquid Organic Hydrogen Carrier) vorantrieb, mit der Wasserstoff zu einem sicheren, flüssigen Stromspeicher umgewandelt wird.

Jochen Steinbauer, verantwortlich für die Wasserstofftechnologie bei Siemens Mobility, bestätigt das enorme Potenzial dieser Technologie für den Transport größerer Energiemengen. Er weiß aber auch, dass aufgrund der räumlichen Enge auf Zügen eine Umwandlung der LOHC-Flüssigkeit in den gasförmigen Zustand auf dem Dach eines Zuges nicht möglich ist.

Siemens Mobility setzt mit dem Hybridzug Mireo Plus H auf gasförmigen Wasserstoff und hat seit 2018 Bemerkenswertes realisiert: ein völlig neues Antriebskonzept, integriert in eine bestehende Fahrzeugplattform. Und all das wurde maßgeblich



Mireo Plus H - die nächste Generation Wasserstoffzüge von Siemens Mobility ■

in Erlangen entwickelt. Das Einzigartige an diesem Zug, so Steinbauer: Er kann Dieselzüge nicht nur ersetzen. Mit seiner enormen Leistungsfähigkeit, Beschleunigung und Geschwindigkeit macht er das Reisen noch komfortabler – und fährt dabei völlig emissionsfrei. Aktuell wird der Mireo Plus H ausführlich im Siemens-Testzentrum in NRW getestet und zugelassen und noch in 2023 wird in Bayern der erste Zug seine Jungfernfahrt absolvieren.

Um diese Technologie „made in Erlangen“ weiter im Markt zu platzieren, bedarf es neben politischer Rahmenbedingungen und Förderungen einer einheitlichen, internationalen Wasserstoffstrategie, für die sich Balleis persönlich stark macht. Investitionen, wie die des Freistaats Bayern durch Fördermit-

tel oder die von Siemens Mobility durch Kommerzialisierung der Technologie, schaffen nachhaltig Arbeitsplätze in Erlangen und treiben den Wandel weiter voran. Wasserstoff und Erlangen werden also auch in Zukunft eine ganze Menge miteinander zu tun haben. ■

## Kontakt:



Jochen Steinbauer



Prof. Siegfried Balleis

## Siemens Mobility GmbH

Jochen Steinbauer  
Siemenspromenade 8  
91058 Erlangen  
[Jochen.Steinbauer@siemens.com](mailto:Jochen.Steinbauer@siemens.com)



## Editorial

# Wasserstoff – ein Energieträger der Zukunft

Klimaneutralität mit „grünem Wasserstoff“ ist schwer zu erreichen – das ist ein großes Ziel! Daran arbeiten Wirtschaft, Wissenschaft und Politik mit Hochdruck und entwickeln langfristige Strategien.

Besonders in den Bereichen Elektrolysetechnologie und Wasserstoffspeicherung ist Bayern weltweit führend. Daraus ergibt sich ein enormes wirtschaftliches Potenzial.

Chancen und Nutzen von Wasserstoff liegen auf der Hand:

- Wie lassen sich Klimaschutz und Mobilität vereinen?
- Wo spielt Wasserstoff im Energiemix der Zukunft die erste Geige?
- Wer stellt die Weichen für neue Antriebstechnologien mit Wasserstoff?
- Welche Forschungen entwickeln und erschließen eine effiziente Energieversorgung mit Wasserstoff-Technologien?
- Wo findet die nachhaltige Wasserstoffwirtschaft fruchtbaren Boden?
- Welchen Status und Perspektiven hat „Grüner Wasserstoff“ als Energieträger für die Wirtschaft?
- Welche beispielhaften H<sup>2</sup>-Kompetenzen findet man in Augsburg?

Eine spannende Welt öffnet sich mit dem Thema Wasserstoff. Bei der Quellensuche unterstützte mich besonders Herr Prof. Dr. Siegfried Balleis.

Ihm gilt mein besonderer Dank!

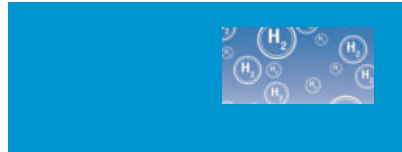

Walter Fürst, Geschäftsführer

**Diese Publikation finden Sie auch im Internet unter [www.media-mind.info](http://www.media-mind.info)**

### Impressum:

<b>Herausgeber:</b>	media mind GmbH & Co. KG Hans-Bunte-Str. 5 80992 München Telefon: +49(0) 89 23 55 57-3 Telefax: +49(0) 8923 55 57-47 E-mail: mail@media-mind.info www.media-mind.info
<b>Verantwortlich:</b>	Walter Fürst, Jürgen Bauernschmitt
<b>Gestaltung + DTP:</b>	Jürgen Bauernschmitt
<b>Druckvorstufe:</b>	media mind GmbH & Co. KG
<b>Verantwortl. Redaktion:</b>	Ilse Schallwegg
<b>Druck:</b>	GRAFIK + DRUCK DIGITAL K.P. GMBH
<b>Erscheinungsweise:</b>	1 mal jährlich

© 2023/2024 by media mind GmbH & Co. KG, München  
Kein Teil dieses Heftes darf ohne schriftliche Genehmigung der Redaktion gespeichert, vervielfältigt oder nachgedruckt werden.

<b>Siemens Mobility GmbH</b>	2. US
<b>Pioniergeist aus Erlangen für einen Energieträger der Zukunft</b> <i>Kontakt: Fochen Steinbauer, Prof. Siegfried Balleis Siemens Mobility GmbH</i>	
<b>Editorial</b> Impressum	3
<b>FREIE WÄHLER LANDTAGSFRAKTION</b>	6
<b>Dr. Mehring: Wasserstoff spielt die erste Geige im Energiemix der Zukunft</b> <i>Autor: Dr. Fabian Mebring, MdL FREIE WÄHLER LANDTAGSFRAKTION</i>	
<b>Grußwort</b> Staatsminister Hubert Aiwanger	7
<b>Bayern</b> International	8
<b>Zukunftstechnologie Wasserstoff – was war und was sein wird</b> <i>Kontakt: Bayern International, Bayerische Gesellschaft für internationale Wirtschaftsbeziehungen mbH</i>	
<b>Stadt</b> Augsburg	10
<b>Wasserstoff – ein vernetzender Energieträger der Zukunft für unsere Region Augsburg</b> <i>Kontakt: Stadt Augsburg, Wirtschaftsförderung, Innovation und Gründung</i>	
<b>KUMAS –</b> Kompetenzzentrum Umwelt .e.V.	12
<b>KUMAS – 25 Jahre wachsende Umweltkompetenz</b> <i>Kontakt: KUMAS – Kompetenzzentrum Umwelt e.V. Thomas Nieborowsky</i>	
<b>H2 Innovation projects</b>	14
<b>Notwendige Forschungen und Entwicklungen zur Erschließung einer effizienten Energieversorgung</b> <i>Autoren: Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Arlt, Andreas Galster, Gerd-Friedrich Witthus, Herbert Köpplinger</i>	
<b>Wasserstoffstrategie</b>	18
<b>Strategie der Wasserstofftechnologie</b> <i>Autor: Prof. Dr. Siegfried Balleis</i>	

**Energiewende** 20

**Wasserstoff – Chance und Schlüssel zur Energiewende**

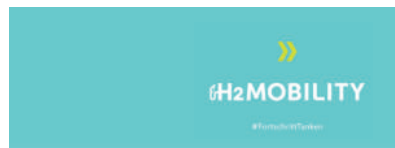
*Autoren: Universität Augsburg, Prof. Dr. Richard Weibrich, Dr. Michael Heine*



**DIE WOCHE DES WASSERSTOFFS 2023** 23

**DIE WOCHE DES WASSERSTOFFS 2023**

*Kontakt: [www.woche-des-wasserstoffs.de](http://www.woche-des-wasserstoffs.de)*



**Metropolregion Nürnberg** 24

**Europäische Metropolregion Nürnberg – fruchtbarer Boden für eine nachhaltige Wasserstoffwirtschaft**

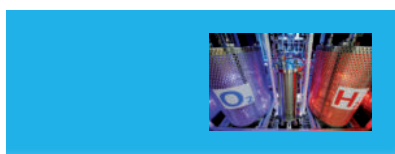
*Kontakt: Industrie- und Handelskammer (IHK) Nürnberg für Mittelfranken*



**Bauhaus Luftfahrt** 27

**Grüner Wasserstoff als Energieträger für die Luftfahrt – Status, Herausforderungen und Perspektiven**

*Kontakt: Bauhaus Luftfahrt e. V.*



**Augsburg Innovationspark** 30

**Der Augsburg Innovationspark mit dem Technologiezentrum Augsburg**

*Kontakt: Augsburg Innovationspark GmbH  
Wolfgang Hehl, Geschäftsführer*



**Institut für Materials Resource Management** 32

**Mit KI zum sicheren H2-Druckbehälter**

*Ansprechpartner: Prof. Dr. Markus Sause  
Universität Augsburg*



**Anzeige media mind GmbH & Co. KG** 3. US

**Anzeige Bayern International** 4. US

# Dr. Mehring: „Wasserstoff spielt erste Geige im Energiemix der Zukunft“

*Ein Überschuss an Energie kann produziert und in Wasserstoff gespeichert werden.*

FREIE WÄHLER LANDTAGSFRAKTION

Putins Überfall der Ukraine hat eine beispiellose Energiekrise ausgelöst. Sie wirkt als Brennglas für energiepolitische Fehlentwicklungen der Vergangenheit und lässt die überfällige Energiewende im Zeitraffer passieren. Triebfeder hierfür ist ein neues öffentliches Bewusstsein um die Notwendigkeit des Zubaus erneuerbarer Energieerzeugungsanlagen. Leider kommt dabei in der öffentlichen Wahrnehmung noch immer zu kurz, dass die Transformation unserer Energieversorgung von fossilen zu erneuerbaren Quellen über Zubau alleine nicht gelingen kann. Stattdessen haben wir insbesondere ein Speicherproblem. Die zentrale Herausforderung besteht darin, erneuerbare Energie vom Tag in die Nacht und vom Sommer in den Winter zu transferieren. Der Gamechanger heißt „Grundlastfähigkeit“. Die Gretchenfrage lautet, ob wir unseren Energiebedarf zukünftig auch in der Dunkelflaute aus erneuerbaren Energien decken können. Erst dann wird ein finaler Abschied von klimafeindlichem Kohlestrom, Atom- und der Abhängigkeit von zweifelhaften Autokraten greifbar. Der Schlüssel hierzu besteht im Wasserstoff, der deshalb die

erste Geige im Energiemix der Zukunft spielen wird. Elektrolyseure vermögen den aktuellen Zustand zu beenden, in dem Solar- und Windparks in Diensten der Netzstabilität abgeschaltet werden müssen, obwohl die Sonne scheint und der Wind weht. In Zukunft kann auf diese Weise ein Überschuss an Energie produziert, in Wasserstoff gespeichert und während der Dunkelflaute verbraucht werden. Die Good News ist: Die Netzinfrastruktur hierfür ist über das Erdgasnetz bereits weitgehend vorhanden – statt neue Stromtrassen zu bauen, kann das bestehende Pipeline-System Zug um Zug umgestellt werden.

Bayern setzt folgerichtig wie keine zweite Region in Europa auf den Wasserstoff. Dies geschieht in der Überzeugung, dass die Energiefrage darüber entscheiden wird, ob es gelingt unseren Wohlstand in die Zukunft zu tragen. Ohne bezahlbare und verlässliche Energie droht uns nämlich eine volkswirtschaftliche Reduzierung auf Forschung und Entwicklung, während Produktionsprozesse weiter in Regionen mit niedrigeren Löhnen und Energiepreisen abwandern werden. Mithilfe von Wasserstoff den gordischen Knoten der

Energiewende zu durchschlagen ist deshalb essentiell für die Zukunft unseres Wirtschaftsstandortes. Auf diese Weise kann es gelingen, die Chance in der Krise zu ergreifen und uns die Spitzenplätze auf den grünen Märkten der Zukunft zu erobern. Dabei darf die Energiewende auch als Chance dafür verstanden werden, die Wertschöpfungspotenziale des Energiesektors zurück in die Regionen Bayerns zu verlagern. ■

*Dr. Fabian Mehring, MdL*  
Parlamentarischer Geschäftsführer

Autor:



FREIE WÄHLER LANDTAGSFRAKTION

*Dr. Fabian Mehring, MdL*  
Abgeordnetenbüro  
Schloßstraße 2c  
86405 Meitingen

Tel: +49 (0) 82 71 / 81 296 – 10

Fax: +49 (0) 82 71 / 81 296 – 29

E-Mail:

abgeordnetenbuero.mehring@fw-landtag.de



Grüner, CO<sub>2</sub>-frei erzeugter Wasserstoff ist der Energieträger der Zukunft. Dabei steht neben dem Einsatz für die Dekarbonisierung der Industrie vor allem die Anwendung im Verkehr im Fokus, denn

durch den Einsatz von Wasserstoff lassen sich Klimaschutz und Mobilität in allen Leistungsklassen vereinen.

Ich bin überzeugt, dass auch zukünftig dem straßengebundenen Verkehr eine wichtige Rolle zukommt, ganz gleich ob im Bereich der Logistik, des ÖPNV oder des Individualverkehrs. Dabei kommt es darauf an, einen intelligenten Technologiemix zu finden, der die Stärken der jeweiligen Antriebsarten bestmöglich nutzt. Im Bereich von Nutzfahrzeugen und der Langstreckenmobilität bietet Wasserstoff durch die großen speicherbaren Energiemengen Lösungen für eine klimaneutrale Mobilität, die mit batterieelektrischen Fahrzeugen nicht oder nur mit großen Kompromissen realisierbar sind. Das wird auf dem Weg zur CO<sub>2</sub>-freien Zukunft ein entscheidender Baustein sein. Wasserstoff und daraus produzierte klimaneutrale Treibstoffe bieten auch die Möglichkeit, z.B. die Luftfahrt umweltfreundlich zu gestalten und zukünftig zu sichern. Mit der Verabschiedung der Bayerischen Wasserstoffstrategie im Mai 2020 hat die Bayerische Staatsregierung dafür wichtige

Weichen gestellt und aktuelle sowie zukünftige Handlungsfelder identifiziert. Eine erste konkrete Maßnahme ist das Bayerische Förderprogramm zum Aufbau einer Wasserstofftankstelleninfrastruktur, welches Anfang Oktober in Kraft getreten ist. Darin fördern wir den Aufbau von öffentlichen sowie betriebsinternen Wasserstofftankstellen für Nutzfahrzeuge und Sonderfahrzeuge in der Logistik. Damit gehen wir einen wichtigen Schritt zum Aufbau einer Basis-Tankstelleninfrastruktur, um den Markthochlauf der Wasserstofftechnologie im Verkehrssektor zu unterstützen. Das Förderprogramm ermöglicht dabei auch die kombinierte Bezuschussung von Elektrolyseuren und bis zu drei Fahrzeugen, um auch die Erzeugungs- bzw. die Fahrzeugseite angemessen zu unterstützen und eine klimaneutrale Mobilität zu ermöglichen.

Ein wichtiges Anliegen der Staatsregierung ist es dabei, Bayern frühzeitig an der Spitze der Technologieentwicklung zu wissen und die Kompetenzen, die in den vergangenen Jahren im Bereich der Spitzenforschung erworben wurden, auch in eine erfolgreiche Industrialisierung zu transferieren. Dafür sind wir mit einer starken Zulieferindustrie und einem innovativen Mittelstand hervorragend aufgestellt! Ich freue mich daher, dass das Thema Wasserstoff nun auch auf deutscher und europäischer Ebene mit der nötigen Entschlossenheit angegangen wird und die gebührende Aufmerksamkeit erfährt – dazu trägt auch dieses Magazin bei.

### Hubert Aiwanger

Bayerischer Staatsminister für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie  
Stellvertretender Bayerischer Ministerpräsident



# Zukunftstechnologie Wasserstoff – was war und was sein wird

*Tik-tak, tik-tak: Der Countdown läuft. Das Ziel? Klimaneutralität bis 2040. Eine zentrale Maßnahme: Grüner Wasserstoff. Am Start: Bayern. Und Bayern weiß: Wer siegen will braucht eine gute Strategie, einen schnellen Start und einen langen Atem.*

Energie aus Erneuerbaren Quellen? Ja klar. Die Krux ist nur: Sie ist nicht wie die fossilen Brennstoffe gleichmäßig verfügbar und muss dementsprechend gespeichert werden. Enormes Potenzial für dieses Vorhaben hat Wasserstoff, der aus Erneuerbaren Energien erzeugt und damit mit dem Label „grün“ markiert wird. Ob Mobilität, Umwandlung, Wärme oder Industrie: All diese Sektoren brauchen viel Energie. Und der Bedarf steigt.

## Führende Bayerische Wasserstofftechnologie als Exportschlager

Bayern ist besonders im Bereich der Elektrolisetechnologie und der (chemischen) Wasserstoffspeicherung und -konversion weltweit führend. Ebenso existieren in Bayern zahlreiche Unternehmen, die sich im breiten Feld Wasserstoff engagieren. Nur um eine Vorstellung zu bekommen: Deutlich über 40 Pro-



*Die Reise nach Saudi-Arabien und Bahrain war die Fortführung einer Serie an Delegationsreisen u.a. nach Dubai und in den Oman auf der arabischen Halbinsel. ©STMWI*



*Die 30 köpfige Delegation reiste Mitte Februar 2023 nach Saudi-Arabien und Bahrain. ©STMWI*

zent der bayerischen Beschäftigten des verarbeitenden Gewerbes sind in Wirtschaftszweigen tätig, die für Wasserstofftechnologien relevant sind. Gerade in gebündelter Form liegt in diesem technologischen Know-How ein enormes wirtschaftliches Potenzial. Gleichzeitig sind in Bayern selbst die Kapazitäten zur Erzeugung von grünem Wasserstoff durch Elektrolyse aufgrund der begrenzten erneuerbaren Energiequellen gering. Die Suche nach verlässlichen Importpartnern ist daher essenziell.

## High-Tech, Innovation und Klimaschutz: Die Bayerische Wasserstoffstrategie

Als Dreh- und Angelpunkt dient das 2019 gegründete Zentrum

Wasserstoff.Bayern (H2.B), das höchst erfolgreich an der Schnittstelle zwischen Wirtschaft, Wissenschaft, Politik und Öffentlichkeit im nationalen und internationalen Kontext agiert. H2.B entwickelt langfristige Strategien wie z.B. die im April 2022 vorgestellte Roadmap für den Hochlauf der bayerischen Wasserstoffwirtschaft, dient als Sprachrohr für politische und wirtschaftliche Aktivitäten und stellt Verbindungen her. Konkret wird das z.B. in der Koordination des Wasserstoffbündnisses Bayern, einer einzigartigen Vernetzungs-, Wissens- und Interessensplattform von mittlerweile über 300 bayerischen Wasserstoff-Akteuren aus Wirtschaft, Wissenschaft und Politik.





Quelle: STMWI © Mariana Ianovska

### Die Beziehung macht den Unterschied – Die Bayern International-Delegationsreisen als Türöffner

Große Expertise allein reicht jedoch nicht. Es braucht zusätzlich den Aufbau der (wirtschaftlichen) Beziehungen vor Ort. Delegationsreisen wie jene im November in den Oman bieten sich dafür an. Nachdem das dortige Sultanat erkannt hat, dass das Land durch Sonne und Wind geradezu prädestiniert ist für die Nutzung erneuerbarer Energiequellen, arbeitet es nun intensiv an einer grünen Wasserstoffwirtschaft. Beide Länder betonen das große Synergiepotenzial. Das Fazit der Delegationsreise: Der Oman ist interessiert an der innovativen bayerischen Spitzentechnologie und H<sub>2</sub> Expertise. Für Bayern wäre der Nutzen sogar doppelt: Der Wissenstransfer ist für die bayerischen Unternehmen lukrativ und Bayern hätte mit dem Oman langfristig einen verlässlichen Wasserstofflieferanten.

### Delegationsreisen 2023: Saudi Arabien, Bahrein und Chile

Im Februar 2023 fand die nächste Delegationsreise in die unmittelbare Nachbarschaft zum Oman, nämlich nach Saudi Arabien und

Bahrein statt. Auch hier sind die Bedingungen zur Produktion von grünem Wasserstoff nahezu ideal. Schon jetzt geben bayerische Akteure wichtige Impulse für eine grüne, exportorientierte Wasserstoffwirtschaft in Saudi-Arabien. Mehrere grüne Wasserstoff-Projekte – wie z.B. jene in Neom – sind in Planung. Die Delegationsreise dient dazu, das große Vertrauen, das der deutschen Technologie von den Saudis entgegengebracht wird, zu nutzen und „Nägel mit Köpfen“ zu machen bzw. neue Geschäftsbeziehungen anzubahnen.

### Günstige Produktion von Wasserstoff in Chile - mit bayerischer Beteiligung

Klimatisch ebenso begünstigt liegt Chile, wohin eine weitere Delegationsreise zum Thema Wasserstoff im März führt. Chile möchte bis 2030 weltweit den günstigsten Wasserstoff produzieren. Die ersten Kontakte wurden von der Repräsentanz von Bayern International, H<sub>2</sub>.B und H<sub>2</sub> Chile bereits geknüpft. Diese heißt es nun zu vertiefen. Besondere Chancen ergeben sich hier für bayerische Firmen aus dem Bereich der Umwelttechnologie. Denn der Schritt zum Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft birgt neben riesigen

Chancen auch viele Herausforderungen z.B. im Wassermanagement und diversen Umwelttechnologien. Herausforderungen, für die bayerische Unternehmen Lösungen anbieten können.

Bayern International ist ein zentraler Akteur in der bayerischen Außenwirtschaftsförderung und unterstützt mit seiner Expertise und einem umfangreichen Netzwerk im In- und Ausland bayerische kleine und mittlere Unternehmen sowie Start-ups bei der Internationalisierung.

Unter <https://www.bayern-international.de/branche/umwelt-energie> werden zahlreiche Projekte der für die bayerische Energiebranche angeboten.

**Bayern**  
International

#### Kontaktdaten:

Bayern International  
Bayerische Gesellschaft für  
Internationale Wirtschafts-  
beziehungen mbH

Rosenheimer Str. 143c  
81671 München  
T +49 89 660566-0  
F +49 89 660566-150  
[www.bayern-international.de](http://www.bayern-international.de)

# Wasserstoff – ein vernetzender Energieträger der Zukunft für unsere Region Augsburg

Das Thema Wasserstoff **vernetzt unterschiedliche Perspektiven, Akteure und Fragestellungen** – auch bei uns in Augsburg und das in so einer kurzen Zeit wie es bisher nur wenige Themengebiete geschafft haben. Die Zukunftstechnologie Wasserstoff beinhaltet ein immenses Potenzial für die Region, welches auf bereits bestehende Akteure und Strukturen zurückgreifen kann.

So verbindet es beispielsweise unsere Kompetenzfelder und bestehende Akteure des Technologiestandorts Augsburg mit den aktuellen wirtschaftlichen Fragestellungen: Wie kann zur Energieeffizienz beigetragen werden? Wie können wir unabhängiger agieren und einen Beitrag zur Klimaneutralität leisten? Wie können Engpässe relativiert aber natürlich auch die Wirtschaftlichkeit und Versorgungssicherheit unserer Region erhalten und verbessert werden? Welche Strukturen müssen hierzu geschaffen werden? Im Besonderen sind schon jetzt verschiedene Einsatzgebiete von Wasserstoff denkbar, auch in Kombination mit anderen Technologien. Beispielhaft sind hier Antriebstechnologien in der Luftfahrt, die Erzeugung von H<sub>2</sub> durch Recyclingverfahren u.v.a.m. zu nennen.

Warum ist das Thema Wasserstofftechnologie jedoch gerade für Augsburg interessant? Das Element Wasser hat Augsburg schon zur Unesco-Welterbestadt gemacht und ist damit ein historisch und gesellschaftlich



Bildquelle: Erste Regionale Zukunftskonferenz Wasserstoff, Stadt Augsburg ■

wichtiger Bestandteil unserer Stadt. Auch in der heutigen Zeit entstehen durch erfolgreiche Vernetzung zukunftsweisende Innovationen „made in Augsburg“, u.a. durch die Kombination von neuen und jedoch auch bewährten Kompetenzen.

„**Ohne Wasserstoff wird die Energiewende nicht möglich sein**“ – hier waren sich im Juli letzten Jahres die Teilnehmenden am regionalen Wasserstofftag in Augsburg einig. Mit 33 Fachausstellern, 14 Expertenvorträgen und zwei Diskussionsrunden lag der volle Fokus auf dem neuen Zukunftsmarkt Wasserstoff. Diese erste Veranstaltung im Technologiezentrum Augsburg war der Auslöser für die „Erste Regionale Zukunftskonferenz Wasserstoff“ in Augsburg, welche im Dezember letzten Jahres folgte und vom Arbeitskreis Wasserstoff im Wirtschaftsraum Schwaben organisiert

wurde – erneut ein voller Erfolg.

Ziel des Arbeitskreises ist es, die regionale Teilhabe an Wasserstofftechnologien zu planen und in der Region zu verankern. „Ich bin sehr stolz darauf, dass wir in Augsburg ein so starkes und motiviertes Netzwerk haben. Das ist die beste Basis auf dem Weg zu einer innovativen Wasserstoffregion“, so meint Dr. Wolfgang Hübschle, Wirtschaftsreferent der Stadt Augsburg.

**Zur Ersten Regionalen Zukunftskonferenz Wasserstoff** (14.12.2022) kamen über 150 Vertreterinnen und Vertreter aus Wirtschaft, Politik und Wissenschaft ins Technologiezentrum Augsburg, um über verschiedene Einsatzmöglichkeiten von Wasserstofftechnologien in der Region zu diskutieren. In dieser partizipativen Zukunftskonferenz zur Wasserstofftechnologie lag der Fokus explizit auf der aktiven Einbringung aller



Bildquelle: Erste Regionale Zukunftskonferenz Wasserstoff, Stadt Augsburg ■

Teilnehmenden. Projektträger und Multiplikatoren sendeten unter der Moderation von KUMAS (Kompetenzzentrum Umwelt e.V.) ein starkes Signal aus der Wasserstoffkompetenzregion Augsburg/Bayerisch-Schwaben an die Welt und die Region im Bereich Wasserstoff viel zu bieten hat. „150 engagierte Teilnehmerinnen und Teilnehmer haben gezeigt, dass Wasserstoff für die Region ein wichtiges Zukunftsthema ist. Wir haben gesehen, dass wir im Bereich Wasserstoff entscheidende Kompetenzen bereits bündeln und vorweisen können. Wir haben aber auch gesehen, dass wir eine schlagkräftige Einheit darstellen, wenn wir uns vernetzen und gleichzeitig an einem Strang ziehen“, bilanziert Nieborowsky die Zukunftskonferenz.

Wichtige Impulsgeberin für die Zukunftskonferenz war die sogenannte „Wasserstoffallianz“, auf die sich Bayern und Baden-Württemberg gemeinsam im letzten Jahr verständigt haben. Die beiden Bundesländer sehen das enorme

Potenzial der Zukunftstechnologie und wollen sich durch die „Wasserstoffallianz“ stärker vernetzen, um Vorreiter auf nationaler und internationaler Ebene bei der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie zu werden. Dafür planen sie, Industrie- und Technologiestandorte in Süddeutschland zu stärken und gemeinsame Industrie- und Forschungsk Kooperationen auf- und auszubauen sowie über die Ländergrenzen hinweg zu fördern.

Aktuell sind daher die Ziele bereits vorhandene Akteure und Projekte im Wasserstofftechnologiebereich kennenzulernen, aktive und noch nicht aktive aber interessierte Akteure zu vernetzen, Kooperationen und Synergien zur Stärkung der Region zu schaffen, Leuchtturm-Projekte zu initiieren, Alleinstellungsmerkmale zu identifizieren, Überregionale Sichtbarkeit und die regionale Marktbedeutung auszubauen. Auswirkungen auf den Arbeitsmarkt und Branchen zu prognostizieren und Herausforderungen der Zukunft entgegenzutreten sowie Lösungen zu

suchen und finden. Wir haben in vielen Produktions- und Materialbereichen beste Kompetenzen: Forschungseinrichtungen, Technologiestandorte wie u.a. den Innovationspark und innovative Unternehmen.

Die Region wird die vorhandenen Potenziale nutzen, entwickeln und aktiv vorantreiben, um sich weiter als innovative Technologieregion zu positionieren. Bereits jetzt überzeugt die Region mit einer Vielzahl von Akteurinnen und Akteuren und kann damit auch in aufkommenden Märkten bestehen. ■

 Stadt Augsburg

*Kontakt:*

Stadt Augsburg  
Wirtschaftsförderung  
Innovation und Gründung  
Karolinenstraße 21  
86150 Augsburg

# KUMAS – Kompetenzzentrum Umwelt e. V.



## 25 Jahre wachsende Umweltkompetenz



### UMWELTNETZWERK für Bayern

Das KUMAS UMWELTNETZWERK mit Sitz in Augsburg feiert im Jahr 2023 sein 25jähriges Bestehen! Ziel des im Jahr 1998 gegründeten Netzwerks ist die Förderung innovativer Umwelttechnologien und die Vernetzung der bayerischen Umweltkompetenzen. Wirtschaft, Kommunen, Kammern, Wissenschafts- und Bildungseinrichtungen arbeiten zu diesem Zweck vertrauensvoll zusammen.

Wichtige Elemente der Arbeit von KUMAS sind der Wissenstransfer, der Erfahrungsaustausch, Informations- und Kontaktvermittlung sowie die nachhaltige Kooperation. Neben der Einhaltung und Weiterentwicklung gängiger Umweltstandards stellen die effiziente Nutzung von Energie und Ressourcen sowie der Klimaschutz wichtige Zukunftsaufgaben dar. Umweltkompetenz ist die wichtigste Voraussetzung, um Produktionsstandorte und die Wettbewerbsfähigkeit zu sichern. KUMAS leistet auch für Kommunen wertvolle Arbeit, wenn es darum geht, das Umweltbewusstsein zu stärken und die natürlichen Lebensgrundlagen zu erhalten.

### Erfolgreiche Arbeit für Bayern

Bayerisch-Schwaben ist eine starke Wirtschaftsregion. Mit Konti-



Auszeichnung der offiziellen KUMAS-Leitprojekte im MAN Museum der MAN Energy Solutions SE ■

nuität in der Zusammenführung und Förderung des Know-hows umweltrelevanter Einrichtungen, Unternehmen und Kommunen leistet KUMAS einen wichtigen Beitrag und bietet allen Mitwirkenden Chancen und Vorteile. Von Augsburg aus vernetzt



Die Auszeichnung „KUMAS-Leitprojekt“ spiegelt das breite Spektrum der Umweltkompetenz wider ■

KUMAS mit seinen Veranstaltungen und Angeboten die bayerische Umweltwirtschaft und Kompetenzträger in einem wichtigen Technologie- und Wirtschaftszweig. Das Bayerische Landesamt für Umwelt (LfU), die Universität Augsburg, die Hochschule für Angewandte Wissenschaften und die Mitglieder leisten dabei einen wichtigen Beitrag, wie zum Beispiel das bifa Umweltinstitut, das eza!-Energie- und Umweltzentrum Allgäu und viele weitere Partner wie z. B. C.A.R.M.E.N. e. V. in Straubing.

### Umweltbildung – Fundament der Nachhaltigkeit

Zusammen mit Universitäten, Hochschulen für angewandte Wissenschaften, Berufsschulen, Tech-



Amtschef, Ministerialdirektor Dr. Christian Barth besucht Fachaussteller der Bayerischen Abfall- und Deponietage 2022 ■

nikerschulen, den Akademien der Kammern und vielen weiteren Bildungseinrichtungen treibt KUMAS die wohl wichtigste Investition in die Zukunft voran: Die Steigerung der Umweltkompetenz und grundlegendes Basiswissen für die nachfolgenden Generationen in neuen Studiengängen und berufsbegleitenden Fortbildungsprogrammen.

### KUMAS-Fachkongresse und Messebeteiligungen

KUMAS hat mit den Bayerischen Abfall- und Deponietagen, den Bayerischen Immissionsschutztagen und den Bayerischen Wassertagen weit über Bayern hinaus bekannte, erfolgreiche Fachkongresse etabliert. Auf internationalen Umweltmessen wie der IFAT

in München ist KUMAS schon seit Jahren mit einem Gemeinschaftsstand für Mitglieder vertreten.

### Integration und Kooperation durch Netzwerkformate

Das breite KUMAS-Serviceangebot mit Informationen, Beratungen, Erfahrungsaustausch und Kooperationsanbahnungen sorgt in Arbeitsgruppen und Netzwerktreffen für die weitere Verbesserung der Rahmenbedingungen für die Umweltwirtschaft in der Region und ganz Bayern.

### Zukunftstechnologie Wasserstoff

KUMAS vereint unter seinem Dach etliche Mitglieder, die sich mit der Entwicklung und Anwendung von Wasserstofftechnologien beschäftigen. Augsburg und Bayerisch

Schwaben haben in diesem Bereich viel zu bieten, wie die 1. Regionale Zukunftskonferenz Wasserstoff im Dezember 2022 im Technologiezentrum des Innovationsparks Augsburg zeigte. Das Konsortium, bestehend aus der Stadt Augsburg, den Landkreisen Augsburg und Aichach-Friedberg, des MRM der Universität Augsburg und der Hochschule Augsburg, IHK Schwaben, Handwerkskammer für Schwaben und dem Augsburg Innovationspark konnte dazu 140 Teilnehmer begrüßen. Projektträger und Multiplikatoren sendeten unter der Moderation von KUMAS ein starkes Signal aus der Wasserstoffkompetenzregion Augsburg/Bayerisch-Schwaben an die Welt.

### KUMAS-Leitprojekte und Deutscher Umweltpreis

KUMAS verleiht schon seit 1998 jährlich die Auszeichnung „Offizielles Leitprojekt des KUMAS UMWELTNETZWERKS“.

Verfahren, Produkte, Dienstleistungen, Konzepte, Entwicklungen oder Forschungsprojekte werden gewürdigt, die mit besonderem Vorbildcharakter geeignet sind, Umweltkompetenz zu demonstrieren. KUMAS ist außerdem vorschlagsberechtigte Institution für den Deutschen Umweltpreis der Deutschen Bundesstiftung Umwelt.



KUMAS-Gemeinschaftsstand auf der IFAT 2022 in München ■

Kontakt:



Thomas Nieborowsky

KUMAS -  
Kompetenzzentrum Umwelt e. V.

Thomas Nieborowsky  
Am Mittleren Moos 48  
86167 Augsburg  
Telefon 0821-450781-0  
info@kumas.de  
www.kumas.de



# Notwendige Forschungen und Entwicklungen zur Erschließung einer effizienten Energieversorgung mit Wasserstoff-Technologien

### Ausgangslage

Es ist allgemein akzeptiert, dass nur Wasserstoff als CO<sub>2</sub>-freier Träger für Energie in Frage kommt. Diese Erkenntnis hat weitreichende Konsequenzen: die gesamte Wirtschaft, die Mobilität und die Wärmeversorgung sind auf Wasserstoff umzustellen. Da sind sehr hohe Investitionen notwendig und mannigfaltige Probleme zu lösen. Der Umstellungsprozess wird Jahrzehnte dauern und somit einen langen Atem erfordern. Es ist daher zwingend, einen graduellen Übergang zu finden. Den Schalter einfach auf Wasserstoff umzulegen, ist unmöglich. Auf jeden Fall ist es einfacher und kostengünstiger, CO<sub>2</sub> zu vermeiden als aus der Luft zu holen, nachdem man CO<sub>2</sub>-produzierende Energieträger benutzt hat. Hinzu kommt die Frage, wo man das abgetrennte CO<sub>2</sub> lagern soll, denn es handelt sich um gigantische Mengen.

### Wasserstoffgewinnung

Der Grund, warum Erdgas (Methan, CH<sub>4</sub>) so billig ist, ist die Tatsache, dass man das Gas in der Erde findet. Man muss nur ein Loch bohren und oft kommt das Methan von allein an die Oberfläche. Das ist bei Wasserstoff anders, daher kann Wasserstoff nie so billig wie Methan sein.

Nur in seltenen Fällen kommt Wasserstoff in der Erde vor. Ein Beispiel ist Mali, wo der Wasser-

stoff verunreinigt mit anderen Gasen aus der Erde gefördert werden kann („weißer Wasserstoff“). Es bleibt nur noch das Problem, wie der Wasserstoff zu den Industriezentren dieser Welt transportiert werden kann.

Die heutige Basistechnologie ist, Wasserstoff aus Erdgas=Methan herzustellen. Dabei wird der Kohlenstoff des Methans zu CO<sub>2</sub>, daher ist dieser Wasserstoff nicht „grün“ sondern „grau“ und hilft nicht gegen den Klimawandel.

Eine weitere Möglichkeit ist es, Wasserstoff durch Elektrolyse von Wasser zu gewinnen, indem man Gleichstrom durch ein Wasserbad, was leitfähig gemacht wurde, schickt. An einem Pol entsteht Wasserstoff, am anderen Sauerstoff, der keinen großen kommerziellen Nutzen hat, aber nicht vermieden werden kann. Allein daher wird der gewonnene Wasserstoff nie so viel Energie enthalten wie die eingesetzte Elektrizität. Wird die Elektrizität CO<sub>2</sub>-frei gewonnen, z.B. durch Photovoltaik oder Windanlagen, ist der entstandene Wasserstoff „grün“ und somit klimaverträglich.

Andere Methoden wie z.B. biotechnologische sind zu vernachlässigen.

### Transport von Wasserstoff

Wasserstoff ist das erste Element im Periodensystem und demnach sehr leicht. Das äußert sich auch in

der Dichte, das heißt in der Frage, wie viel ein Kubikmeter Wasserstoff wiegt. Bei 20°C und 1013 mbar (also Umgebungsdruck) sind 84 Gramm Wasserstoff im inneren Volumen von einem Kubikmeter eines Behälters, verschwindend wenig. Damit verbietet sich der Transport von Wasserstoff bei Umgebungsdruck. Eine Transportform muss folgende Bedingungen erfüllen:

1. Sie muss leicht importierbar sein, am besten per Schiff
2. Sie darf keine hohen Ausgaben für eine neue Infrastruktur nach sich ziehen
3. Sie soll keine Gefahr für die Umwelt und die Menschen darstellen

Eine Möglichkeit zum Transport ist es, Wasserstoff auf höheren Druck zu verdichten, gängig sind heute 350 bar und 700 bar. Zu beachten ist, dass sich bei 700 bar nicht doppelt so viel Wasserstoff im Volumen befindet wie bei 350 bar, sondern weniger. Bei 350 bar und Umgebungstemperatur sind 26 kg Wasserstoff im inneren Volumen, wobei das äußere Volumen durch die Wandstärke des Behälters größer ist. Auch das ist kein attraktives Ergebnis.

Eine weitere Möglichkeit ist die Verflüssigung von Wasserstoff. Die Menge in einem 1 Kubikmeter Behälter ist mit 71 kg flüssigem Wasserstoff attraktiv (vergleiche: 1 Kubikmeter Wasser wiegt etwa

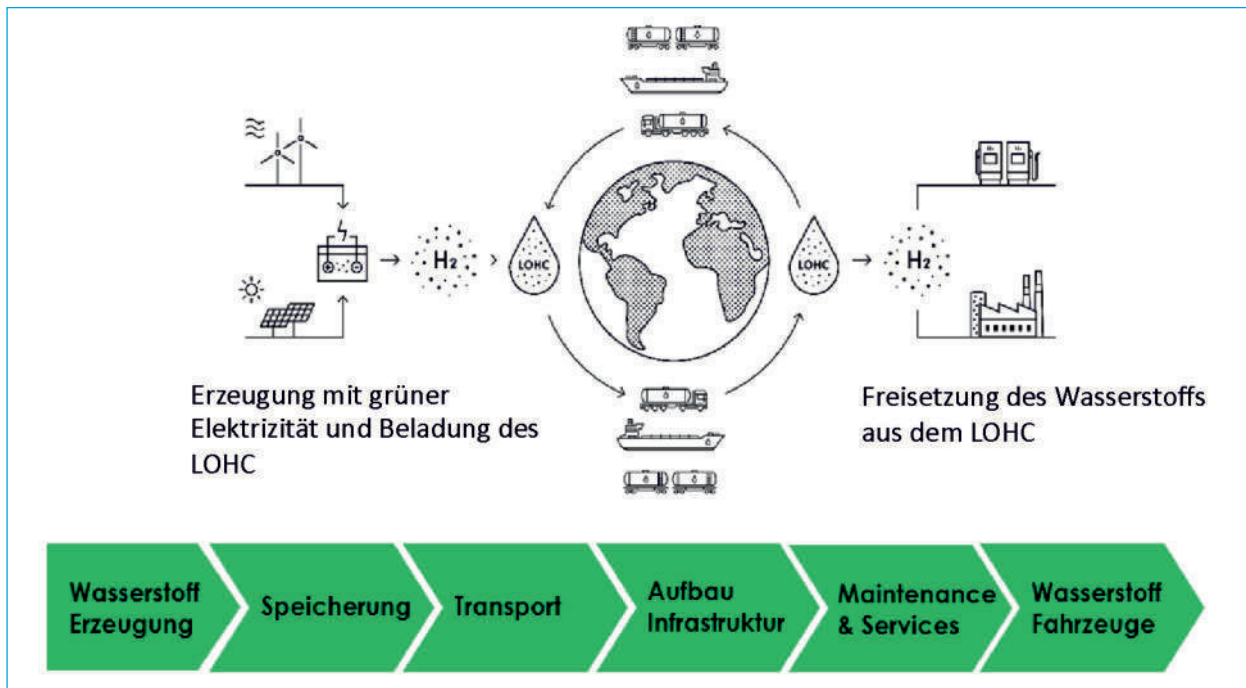


Abb. 1: Diese Verbindungen werden Liquid Organic Hydrogen Carrier (LOHC) genannt. Sowohl die unhydrierte Form als auch die hydrierte Form sind hochsiedende Öle und lassen sich folglich in jedem Transportmittel, das für Flüssigkeiten gebaut ist, speichern und transportieren. ■

1000 kg), aber die zugehörige Temperatur von  $-253^{\circ}\text{C}$  ist es nicht. Diese Temperatur liegt außerhalb der häufigen Anwendung in der heutigen Industrie, die bei  $-200^{\circ}\text{C}$  (Verflüssigung von Luft) endet. Zudem ist es energieaufwändig, auf so niedrige Temperaturen zu kommen, denn die Kälteprozesse werden umso weniger effizient, je kälter es ist. Beim Wasserstoff kommt eine weitere Komplikation hinzu, nämlich das Gleichgewicht von ortho und para Wasserstoff. Dieses macht die Verflüssigung schwieriger. Das äußere Volumen des Behälters ist durch die Wärmeisolierung gegeben. Selbst die beste Isolierung kann einen Wärmetransport in das Gefäß nicht verhindern, der zur Bildung von gasförmigen Wasserstoff führt (in der Technik als Boil-off bezeichnet). Mit dem Boil-off Gas muss man umgehen. Nach einiger Zeit ist ein Behälter mit flüssigem Wasserstoff trotz Wärmeisolierung leer. Es gibt bisher ein Schiff (in Japan, „Suiso Frontier“), das flüssigen Wasserstoff transportiert.

Viel versprechend ist die chemische Umwandlung von Wasserstoff in eine gut transportierbare Form. Eine Variante ist die Herstellung

von Ammoniak  $\text{NH}_3$ , wo einem Stickstoff-Atom 3 Wasserstoffatome gegenüberstehen, in Masse 14:3, ein sehr gutes Verhältnis. Obwohl bisher nur im Labor gezeigt, sollte sich Ammoniak am Zielort wieder in Wasserstoff und Stickstoff spalten lassen, um den Wasserstoff nach Trennung vom Stickstoff verwenden zu können. Zudem ist Ammoniak eine Grundchemikalie mit einem Bedarf von vielen Millionen Tonnen pro Jahr allein in Deutschland. Schiffe, die Ammoniak transportieren, gibt es. Allein die Einordnung als Störfallstoff macht Ammoniak zu einem hoch problematischen Stoff, sodass nur die Versorgung der Chemie mit Ammoniak vertretbar erscheint, nicht jedoch die breite Wirtschaft oder gar der Bürger. Zudem ist ein Trend von Entwicklungs- und Schwellenländern zu Ammoniak feststellbar, denn aus Ammoniak und dem Oxidationsprodukt Stickoxide lässt sich leicht der sehr wirkungsvolle Sprengstoff Ammonitrat herstellen, wie z.B. Beirut oder Oklahoma-City eindrucksvoll nachgewiesen haben.

Diese Nachteile vermeidet die Reaktion von Wasserstoff mit einer aromatischen Verbindung (siehe Abb. 1).

Die Suche nach geeigneten Stoffpaarungen (hydriert und unhydriert) ist schwierig. Dabei ist nicht die Hydrierung sondern die Dehydrierung der schwierige Schritt. Das chemische Gleichgewicht der Reaktion muss einmal auf der Seite des hydrierten Produktes liegen (Beladung mit Wasserstoff), auf der anderen auf der des Wasserstoffs (Freisetzung des Wasserstoffs). Die notwendige Änderung der zuständigen Freien Reaktionsenthalpie wird durch Temperaturänderung bewirkt. Die Beladungsreaktion ist immer exotherm, die Freisetzung demgemäß im gleichen Maße endotherm. Das schmälert die Energiemenge, die im freigesetzten Wasserstoff enthalten ist. Es zwingt gleichzeitig zu einem Energiemanagement. Vorteilhaft ist der Einsatz von Hochtemperaturbrennstoffzellen, sogenannten solid oxide fuel cells, SOFC, zur Rückwandlung des Wasserstoffs in Elektrizität, da sowohl das Temperaturniveau als auch die Energiemenge oft zur benötigten Wärmemenge für die Freisetzung passen.

Weltweit wird an LOHC (Liquid Organic Hydrogen Carrier) in Wuhan (China), Japan und Erlangen geforscht. Die Erlanger Firma



Abb. 2: Beladenes (LOHC+) und unbeladenes (LOHC-) ■

Hydrogenious LOHC Technologies ist im Vergleich am weitesten fortgeschritten, sie baut kleine Anlagen als Container und große Chemieranlagen und besitzt eine Vielzahl von Patenten, sowohl für Stoffe (siehe Abb. 2 und 3) als auch für Verfahren. Die momentan präferierten Stoffe sind Dibenzyltoluol und Monobenzyltoluol, die mehrere Forderungen erfüllen: sie sind ungiftig, lassen sich in jeder Art Tank lagern und lassen sich sehr schwer entflammen. Das aromatische Produkt ist immer etwas gelblich gefärbt, das aliphatische ist wasserklar (siehe Abb. 2). Ist Beide Stoffe werden allein in Deutschland im 10.000 to Maßstab pro Jahr hergestellt, sie sind ein Wärmeübertragungsöl. Damit erfüllen diese Stoffe die oben aufgestellten Kriterien. Zudem sind kaum Investitionen in die Infrastruktur notwendig. Während der Transport aus fernen Ländern, die ein wesentliches besseres Angebot an erneuerbaren Energien haben, per Seeschiff erfolgen kann, wird vorgeschlagen, sie in den Seehäfen auf Flussschiffe umzuladen und das exzellente deutsche Netz der Binnenschiffahrtsstraßen zu nutzen. Somit ist eine graduelle Einführung von Wasserstoff, wie oben gefordert, möglich. Am Zielort kann das LOHC in bereits vorhandenen Tanks für Flüssigkeiten gelagert oder zum Zielort weiter transportiert werden: per Pipeline, Bahn

oder LKW, oder freigesetzt und als Wasserstoff weiter transportiert werden.

Alternativ können vorhandene Ölpipelines genutzt werden wie die TAL von Triest nach Ingolstadt und Karlsruhe. Auch hier ist ein gradueller Übergang von Öl auf Wasserstoff möglich, ein wichtiges strategisches Argument.

### Bisher bekannte Anwendungen von LOHC

Wie oben erläutert, generiert LOHC bei der Speicherung und beim Transport von Wasserstoff entscheidende Vorteile. So gibt es erste LOHC - Lösungen bei der Anwendung von Wasserstoff

- im Bereich zur Erzeugung von Prozesswärme in der Groß- und Schwerindustrie bei der Stahl- und Aluminium-Erzeugung auch als Reduktionsmittel und der Weiterverarbeitung von Halbzeugen
- im Mobilitätsbereich bei der Versorgung von Tankstellen für Züge, schweren LKW's und Bussen des ÖPNV

Im Flächenbundesland Bayern haben sich Ende Februar 2023 rund 200 Vertreter der Land- und Forstwirtschaft beim Wasserstoff-Gipfel getroffen. Ein wichtiges

Ziel des Wasserstoffgipfels war die Vernetzung aller Akteure. Eingeladen hatte der bayerische Wirtschaftsminister, Wasserstoff öffnet viele Türen in die Zukunft der dekarbonisierten Energie und bietet der Land- und Forstwirtschaft gute Perspektiven. Am Tag drauf trafen sich etwa 100 Landwirte, Hersteller von Anlagen und Wissenschaftler auf einem Wasserstoffgipfel, zum dem der Generalsekretär der CSU Martin Huber nach Unterneukirchen eingeladen hatte.

Die Landwirtschaft ist aber nicht nur ein potentieller Erzeuger von Wasserstoff aus Stroh, Holzresten und Biomasse, sondern auch ein Anwender: Die Trocknung von Getreide, Holz, Heu und Hopfen mit einem sehr hohen Energiebedarf und der Betrieb von Fahrzeugen.

Der Landmaschinenhersteller Fendt stellte den ersten Prototypen eines wasserstoffbetriebenen Traktors im Frühjahr 2023 aus. So könnte ein Bauernhof Energie-autark betrieben werden.

- im Bereich einer klimaverträglichen Infrastruktur für Gebäude (Schulen und Quartiere) durch Fern- und Nahwärmenetze



Abb. 3: Der Geschäftsführer Dr. Teichmann der Fa. Hydrogenious LOHC Technologies, BDI-Präsident Prof. Russwurm und Mitfirmengründer Prof. Arlt (von re nach li). ■





Abb. 4: Freisetzungsanlage von Wasserstoff der Fa. Hydrogenious LOHC Technologies an der Wasserstofftankstelle in Erlangen ■

- im Bereich stationärer Anwendungen bei der Versorgung abgelegener Ortschaften und Skigebiete, deren elektrische Energieversorgung noch mit dieselgetriebenen Generatoren sichergestellt wird.

In einer ganzheitlichen Betrachtung werden durchgängige Lösungen von der Wasserstoffgewinnung über die Speicherung, den Transport und den Aufbau einer Infrastruktur zur Hydrierung und Dehydrierung des LOHC angestrebt.

Die H2-Innovation Gruppe aus Erlangen konzentriert sich aktuell im

- Mobilitätssektor auf den Einsatz von H2-Hybridbussen im ÖPNV und den Einsatz von H2-Hybrid LKW im kommunalen und im Speditionsbereich. Es werden ganzheitliche Verfahrensketten über die Erzeugung des Wasserstoffs bis zum Aufbau und der Versorgung der Tankstellen (Abb. 4) untersucht.
- Gebäudesektor und bei der Versorgung abgelegener Ortschaften und Skigebiete auf Anlagen, die eine Speicherung der durch Photovoltaik, Wind oder Biomasse erzeugten Energie ermöglichen und zu einem späteren Zeitpunkt abrufbar machen, so dass eine anforderungs- und bedarfsgerechte Wärme- und Energieversorgung ermöglicht wird.

Hier wird auf eine Optimierung sämtlicher Verfahrensschritte in den Anlagen zur Elektrolyse, zur Hydrierung und Dehydrierung des LOHC und zur Umwandlung des Wasserstoffs in der Brennstoffzelle bzw. im Blockheizkraftwerk in Wärme und Energie geachtet. Hier kann der Wankelmotor eine Renaissance erleben.

Auf dem Weg zur Klimaneutralität, werden z. Zt. in Zusammenarbeit mit mehreren Kommunen energieautarke Insellösungen entwickelt: z.B für neu zu errichtende Schulgebäude mit angrenzenden Wohngebieten und weiteren öffentlichen Gebäuden. In einem 2. Schritt werden die Inseln dann miteinander verbunden mit dem Ziel, eine gesamte Gemeinde energieautark und klimaneutral aufzustellen. Dass das möglich ist, wurde im Ort Wildpoldsried (Allgäu) ab 1999 in einem Feldversuch gezeigt.

Diese Vorgehensweise lässt sich bei kleineren Gemeinden mit geringer energieintensiver Industrie und hohem Anteil eigener Energieerzeugung gut darstellen. Bei größeren Städten bzw. bei energieintensiven Industriebetrieben ist eine Versorgung mit extern zu beschaffendem Wasserstoff unumgänglich.

Da die Versorgung mit grünem Wasserstoff, der in Deutschland/Europa erzeugt werden kann, für die angestrebte Energiewende

nicht ausreicht, ist es notwendig, grünen Wasserstoff aus Ländern mit hoher Sonneneinstrahlung und/oder günstigen Windverhältnissen (z.B. Nordafrika, VAE) zu importieren.

Der LOHC-Technologie kann hierbei eine entscheidende Rolle zukommen, denn mit dieser Technologie kann die vorhandene Infrastruktur der Binnenwasserstraßen weiter genutzt werden: Anlandung des beladenen LOHC in Seehäfen, Weiterverteilung mit Binnenschiffen, Pipelines, Zügen oder LKW. Beim Umstieg auf Wasserstofftechnologien ergibt sich somit ein entscheidender Zeit- und Kostenvorteil.

Wasserstoff wird für die nachhaltige Energieversorgung der zentrale Lösungsbaustein werden, auch für künftige Generationen. Politik, Wirtschaft und Industrie sind aber schon jetzt gefordert die richtigen Entscheidungen und Maßnahmen zu treffen. Die Verfasser dieses Artikels laden zur systemübergreifenden Zusammenarbeit ein.

**Autoren:**



**Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Arlt**  
Lehrstuhl für Thermische Verfahrenstechnik  
Uni Erlangen  
Egerlandstr.3  
91058 Erlangen

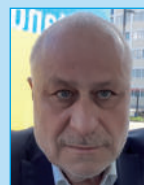
**H2 Innovation projects**



**Andreas Galster**



**Gerd-Friedrich Witthus**



**Herbert Köpplinger**



# Strategie der Wasserstofftechnologie

Spätestens seit Beginn des Angriffs-kriegs Russlands gegen die Ukraine am 24. Februar 2022 hat die Bedeutung des Einsatzes von Wasserstoff für unsere Energiewirtschaft einen ungeahnten Aufschwung genommen.

Die Ursache dafür ist, dass die bislang bestehende einseitige Abhängigkeit Deutschlands von Gas- und Öllieferungen aus Russland drastisch verringert werden musste, und eine fieberhafte Suche nach alternativen Energielieferungen begann.

Zur Ehrenrettung der Politik muss aber auch in Erinnerung gerufen werden, dass die EU-Kommission auf europäischer, die Bundesregierung auf deutscher und die bayerische Staatsregierung auf bayerischer Ebene bereits knapp zwei Jahre zuvor die Bedeutung des Einsatzes von Wasserstoff für die Energiewirtschaft erkannte und entsprechende Wasserstoffstrategien verabschiedet hat.

Erfreulicherweise hat der Freistaat Bayern bereits im Mai 2020 eine entsprechende Wasserstoffstrategie vorgelegt.

Es folgte dann vier Wochen später im Juni 2020 die Wasserstoffstrategie der Bundesrepublik Deutschland und wiederum vier Wochen später im Juli 2020 die Europäische Kommission mit ihrer Wasserstoffstrategie. ■

### Die bayerische Wasserstoffstrategie

Der Freistaat Bayern hat in seiner Wasserstoffstrategie das ehrgeizige Ziel formuliert, in diesem Bereich



Prof. Dr. Siegfried Balleis, Stefan Müller, parlamentarischer Geschäftsführer der CSU in Deutscher Bundestag, Dr. Daniel Teichmann, Geschäftsführer der Firma Hydrogenius  
Foto: Kai Stürmer ■

die Technologieführerschaft anzustreben und weltweite Marktpotenziale zu erschließen und auszubauen. Weiterhin ist Gegenstand dieser Strategie die Erhöhung der Wirtschaftlichkeit des Einsatzes von Wasserstoff durch eine industrielle Skalierung.

Schließlich will der Freistaat Bayern auch die Wasserstoffinfrastruktur für Wasserstoffanwendungen im Freistaat vor allem im Bereich von Verkehr und Industrie vorantreiben.

Konkret hat sich der Freistaat Bayern beispielsweise zur Installation zahlreicher Wasserstofftankstellen verpflichtet. Der Freistaat Bayern sieht durch die Nutzung von Wasserstoff vor allen Dingen auch die Möglichkeit, Strom, der im windreichen Norden der Republik erzeugt wird, in die industriellen Zentren Bayerns zu transportieren. Der Freistaat Bayern hat diese Strategie im

Frühjahr 2022 mit der Veröffentlichung einer Wasserstoff-Road-Map weiter konkretisiert und entsprechende Handlungsempfehlungen beschlossen. Diese Maßnahmen beinhalten beispielsweise den Ausbau einer nationalen und internationalen Wasserstoffpipeline-Infrastruktur und den Ausbau von Elektrolysekapazitäten im Freistaat Bayern selbst. ■

### Die deutsche Wasserstoffstrategie

Die aus der damaligen großen Koalition bestehende Bundesregierung hat 2020 die Wasserstofftechnologie als Kernelement der Energiewende definiert, um mit Hilfe erneuerbarer Energien Produktionsprozesse zu dekarbonisieren. Die Bundesregierung hat in dieser Strategie weiterhin zugesichert, dass sie die regulativen Voraussetzungen für den Markt-

hochlauf der Wasserstofftechnologie schaffen will und dass im Bereich von Forschung und Entwicklung innovative Wasserstofftechnologien forciert werden sollen.

Die Bundesregierung hat zwischenzeitlich auch einen detaillierten Aktionsplan zur Wasserstoffstrategie vorgelegt, der sich vor allem auf die Erzeugung von Wasserstoff und die Nutzung von Wasserstoff im Bereich von Verkehr und Industrie konzentriert.

Der Aktionsplan beinhaltet aber Themen wie die Nutzung von Wasserstoff im Gebäudebereich beispielsweise durch hocheffiziente Brennstoffzellenheizgeräte und die Umwidmung bestehender Erdgaspipelines für den Transport von Wasserstoff.

Außerdem werden in einer ressortübergreifenden Forschungsoffensive "Wasserstofftechnologie 2030" Forschungsmaßnahmen zu Wasserstoff-Schlüsseltechnologien strategisch gebündelt. ■

### Die europäische Wasserstoffstrategie

Die Europäische Kommission hat sich in ihrer Wasserstoffstrategie vom Juli 2020 darauf verpflichtet, eine nachhaltige industrielle Wertschöpfungskette für die Erzeugung von Wasserstoff aufzubauen. Weiterhin hat sie die Förderung des Einsatzes von Wasserstoff für Industrieanwendungen und Mobilitätslösungen angekündigt und die Förderung von Forschung und Innovation im Bereich der sauberen Wasserstofftechnologie in Aussicht gestellt. Schließlich hat sie auch eine Zusammenarbeit mit Nachbarländern und Nachbarregionen der Europäischen Union im Hinblick auf einen weltweiten Wasserstoffmarkt angekündigt. Dass es die Europäische Kommission nicht bei Ankündigungen belassen wird, wurde im Juli 2022 deutlich, als sie die sogenannten IPCEI Projekte (Important Project of Common European Interest) im Rahmen ihrer EU-Hilfsvorschriften genehmigt hat.

Insgesamt haben 15 Mitgliedstaaten der Europäischen Union dieses Projekt vorbereitet und sich darauf verpflichtet, 5,4 Milliarden Euro an öffentlichen Mitteln bereitzustellen. Man geht weiter davon aus, dass zusätzliche private Investitionen in einem Umfang von 8,8 Milliarden Euro mobilisiert werden.

Absolut problematisch sind aber Pläne der EU-Kommission, dass für die Wasserstoffproduktion nur Strom verwendet werden kann, der aus eigens dafür gebauten Solar- und Windkraftanlagen stammt. Dieser sog. delegierte Rechtsakt der EU-Kommission bremst nach Ansicht der Wasserstoffbranche und der Vorsitzenden des nationalen Wasserstoffrates, Frau Katharina Reiche, mit seinen restriktiven Kriterien den Hochlauf für grünen Wasserstoff. Frau Reiche, hat ihre Kritik wie folgt zugespitzt formuliert: „Man kann ein Stahlwerk nicht nur dann betreiben, wenn der Wind weht“.

Die USA steuern in diesem Zusammenhang wesentlich pragmatischer, dort fällt die Steuergutschrift für Wasserstoff umso höher aus, je niedriger die CO<sub>2</sub>-Emissionen des eingesetzten Stroms sind. Die EU dagegen steht sich hier selbst im Weg, indem sie verlangt, dass der Wasserstoff zu 100 % grün sein muss, andernfalls falle man ganz aus der Förderung.

Seit einiger Zeit engagiert sich auch der Bundeswirtschaftsminister intensiv darum, wie aus verschiedenen Ländern und unterschiedlichen Wegen Wasserstoffimporte aus dem Ausland realisiert werden können. Beispielsweise sind hier konkrete Verträge mit Norwegen in der Diskussion, aber auch große Projekte zur Erzeugung von Wasserstoff in Namibia und auch in mehreren nordafrikanischen Staaten.

Tatsache ist nämlich, dass auch in Zukunft nur ein relativ überschaubarer Teil des benötigten Wasserstoffs in Deutschland selbst hergestellt werden kann. Die Bundesrepublik Deutschland die beispielsweise

heute 70% aller Energieträger importiert, wird sicher auch auf Dauer ein Energieimport-Land bleiben. Der Unterschied besteht nur darin, dass in Zukunft nicht mehr Öl und Gas sondern Wasserstoff importiert wird.

Mit Wasserstoff kann – wie bereits weiter oben erwähnt – ein wesentlicher Beitrag zur Dekarbonierung unserer Volkswirtschaft geleistet werden.

Welche Transportmethoden dafür in Zukunft die Oberhand gewinnen werden ist heute noch offen. Zahlreiche Politiker und Wirtschaftsvertreter setzen auf den Transport von Ammoniak. Wesentlich unproblematischer und auch ungefährlicher ist allerdings der Transport von an LOHC (Liquid Organic Hydrogen Carrier) gebundenen Wasserstoff.

Dieser Transportmodus, der im Erlanger Unternehmen Hydrogenious von den Professoren Wasserschheid, Arlt und Schlücker sowie dem Geschäftsführer Herrn Dr. Daniel Teichmann entwickelt wurde, ermöglicht es, die gesamte bisherige Transportlogistik „eins zu eins“ zu nutzen, nur dass in Zukunft in Tankschiffen, LKW und Kesselwagen der Bahn nicht mehr Erdöl oder Erdölprodukte, sondern an LOHC gebundener Wasserstoff absolut ungefährlich transportiert wird. Dies gilt im übrigen auch für den Transport von Wasserstoff durch Pipelines. Hier ist es vorstellbar, dass Wasserstoff nicht nur gasförmig transportiert wird, sondern ebenfalls an LOHC gebunden. ■

Autor:



Prof. Dr.  
Siegfried Balleis

Tel: +49 9131 534944

Mobil: +49 171 3606363

Email: siegfried@balleis.de

# Wasserstoff – Chance und Schlüssel zur Energiewende?

Seit über 4 Milliarden Jahre laufen auf unserem Planeten chemische Prozesse ab, die zur Ausbildung einer Erdatmosphäre geführt haben, wo tierische und pflanzliche Zellen sich weiter entwickeln konnten und so zu dem heutigen uns bekannten Erscheinungsbild von Fauna und Flora geführt haben. Eine wichtige Rolle hat hier der Kohlenstoff und das Wasser gespielt, die zusammen mit den Elementen Schwefel, Phosphor und Stickstoff letztendlich die Entstehung lebensfähiger Organismen erst möglich gemacht hat.

Seit Urzeiten kann die Natur effizient mit ihren Ressourcen umgehen. So wächst und gedeiht in der Pflanzenwelt alles in satterm Grün, produziert keine Abfälle und verbraucht ihre Ressourcen nicht. Wie macht sie das?

Das Geheimnis ist ihr spezieller Umgang mit den auf der Erde verfügbaren energetischen und stofflichen Ressourcen. Energie bezieht die Natur von der unendlichen Quelle der Sonne des weiß-blauen Himmels (Abb. 1). Die hier genutzte Photosynthese der pflanzlichen Zellen ist nicht mal besonders effizient und hat einem schlechten Wirkungsgrad, aber sie produziert dennoch extrem große Mengen an Biomasse.

Das zweite und entscheidende Geheimnis der Natur ist der effiziente Umgang mit den begrenzten stofflichen Ressourcen der Welt. Die Natur unterscheidet nicht zwischen Rohstoff und

Abfall, sondern führt die entscheidenden Elemente, v.a. Wasserstoff (H), Kohlenstoff (C), Sauerstoff (O), Stickstoff (N) und einige Metalle (M) grundsätzlich im Kreislauf. Weil diese Grundbausteine so immer wieder neu zu chemischen Verbindungen verknüpft werden, sind sie beliebig oft verwendbar – seit Jahrmillionen.

Die Lebens- und Wirtschaftsweise moderner Industrienationen unterscheidet sich hier vom Konzept der Natur grundsätzlich in der Gewinnung und Nutzung von Energie und Ressourcen. Wie bekannt, haben seit Beginn des Industriezeitalters stufenweise bahnbrechende Innovationen von der Dampfmaschine bis zum moder-

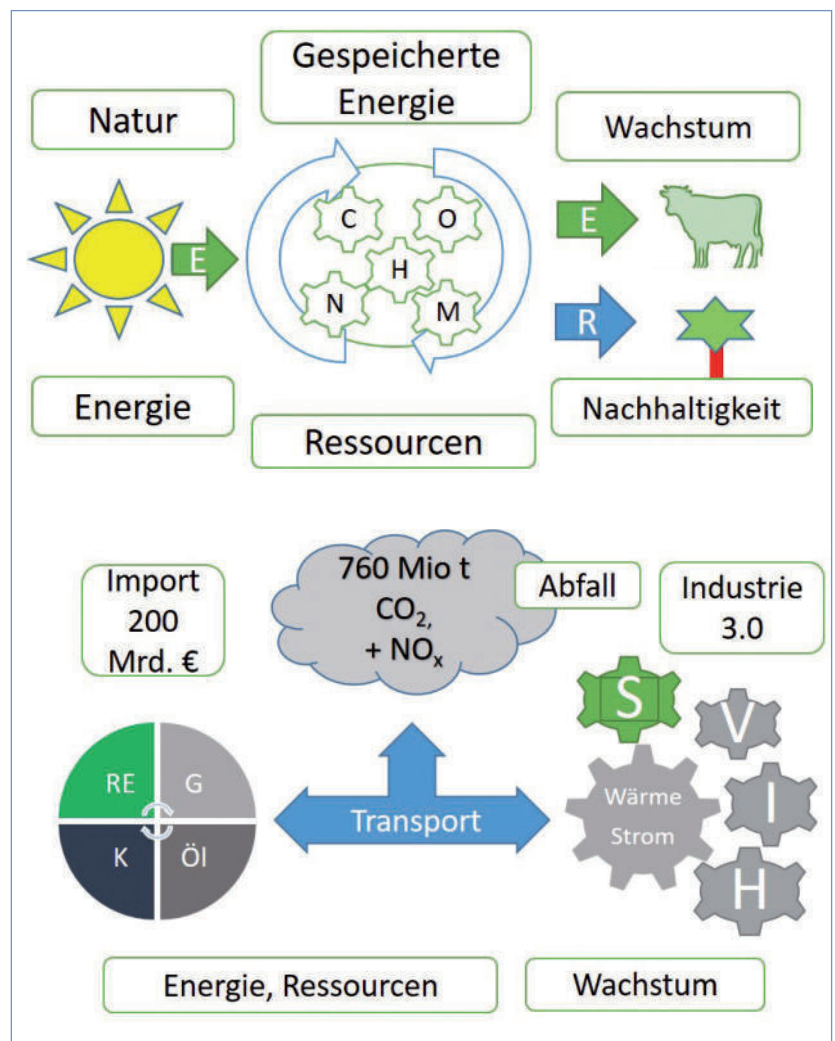


Abb. 1: Energie- (E) und Ressourcen-Nutzung (R) durch Natur (oben) und Menschen (unten) in den Sektoren Stromgewinnung (S), Verkehr (V), Industrie (I), Haushalt (H). ■

nen Smartphone unser Leben maßgeblich beeinflusst und zu enormem Wachstum in der Wirtschaft und zum Wohlstand geführt. Dabei werden permanent Energie und Ressourcen als stofflich endliche Quellen der Natur entnommen und zum größten Teil nicht regeneriert, sondern geht als Abfall oder Reststoff erst einmal verloren. Insbesondere die Energiegewinnung basiert z.B. in Deutschland noch immer zu ca. 75% auf fossilen Energieträgern, also auf dem Kohlenstoff, der seit Jahrmilliarden gespeichert wurde. Der jährliche Primärenergiebedarf von ca. 3200 TWh wurde im Jahre 2021 zu 75% aus Kohle, Erdgas und Erdöl gedeckt. Der größte Anteil des Energiebedarfs wurde damals noch für ca. 150 Mrd. Euro importiert (heute deutlich höher) und zu ca. 760 Mio. kg CO<sub>2</sub> verbrannt. Deutschland ist damit Nr.1 in Europa bei den CO<sub>2</sub>-Emission. Wie uns die aktuellen Jugendbewegungen und Kriegshandlungen gerade vor Augen führen, machen uns der Import der Energie dadurch stark abhängig von den

Ländern mit fossilen Kohlenstoff-Vorkommen und führen zwangsläufig zur wirtschaftlichen Gefährdung in Krisenzeiten. Zusätzlich sind seit Jahren der Klimawandel und die Umweltzerstörung zur existentiellen Bedrohung für Europa und die Welt geworden, weshalb die EU-Kommission und die Bundesregierung in zunehmendem Umfang eine nachhaltige Lebens- und Wirtschaftsweise anstreben. Man orientiert sich hier an den Zielen der Dokumente von Rio aus 1992. In der Tat wird dazu die Energiegewinnung nach dem Vorbild der Natur auf unerschöpflichen Quellen von Sonne, Wind und Wasser umgestellt. Als Schlüsselsektor wurde die Stromgewinnung (S) bereits zu 50% auf regenerativen Energiequellen (RE) umgestellt. Bei der Dekarbonisierung bzw. der Defossilierung der Sektoren Verkehr (V), Haushalte (H, v.a. Heizung) und Industrie (I) bietet die Elektrifizierung enorme Potentiale und zeigt aber auch zahlreiche noch ungelöste Schwierigkeiten auf wie z.B. die limitierten

Ausbaumöglichkeiten von Wind-, Solar- und Biogasanlagen als regenerative Quellen. Hinzu kommen oftmals die großen Distanzen zwischen dem Ort der Energie-Gewinnung und dem Ort der Nutzung. Fehlende ausreichend große Energie-Speicher, Netz-Stabilisatoren und Leitungen zum Transport großer Mengen Energie kommen hinzu. Die aktuell verfolgte Batteriespeichertechnologie zeigt wohl zunehmend Fortschritte, ist aber aufgrund begrenzter Rohstoffressourcen und dem hohen Speichergewicht für den Transport schwerer Güter, wie z.B. beim LKW-Transport, bei Schiffen und Flugzeugen nur schwierig oder nicht wirtschaftlich einsetzbar. Hier kommt das Element Wasserstoff ins Spiel. Wasserstoff ist das am meisten verbreitete Element im Universum. So besteht die Sonne fast vollständig aus Wasserstoff und auf der Erde ist der Wasserstoff im Wasser gebunden. Er bildet zusammen mit dem Kohlenstoff die Grundlage der lebenden Organismen und ist in ex-

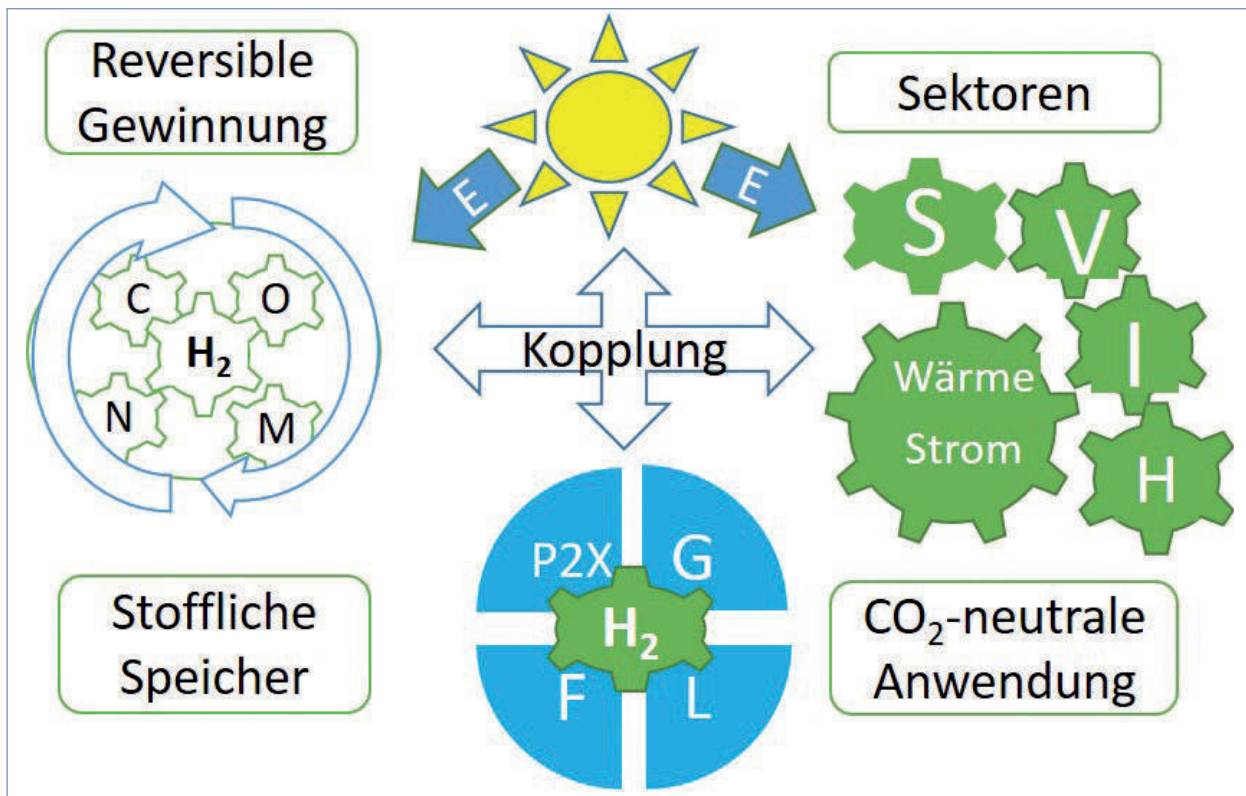


Abb. 2: Kopplung von Energie- und Ressourcennutzung mit Hilfe von Wasserstoff. ■

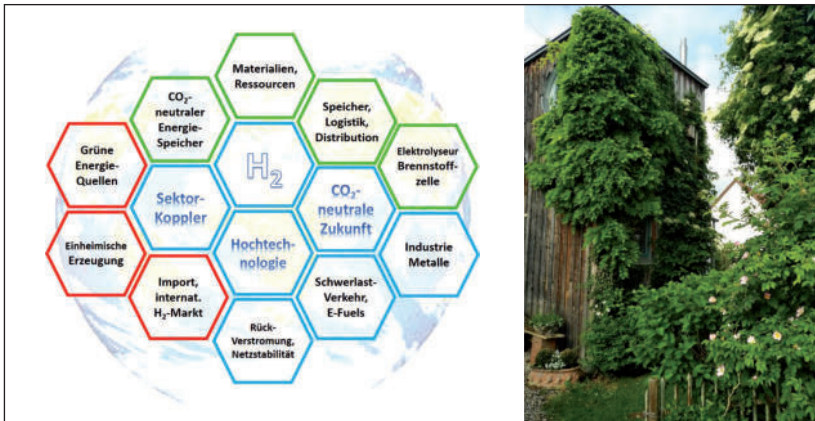


Abb. 3: Aspekte der Wasserstoff-Technologie ■

trem großer Menge verfügbar. Er ist grundsätzlich chemisch gebunden, kann aber durch Energiezufuhr freigesetzt werden. Wie in Abb.2 dargestellt, kann Wasserstoff als Riesen-Akku regenerative Energie (Strom, Wärme) an allen Orten der Erde beliebig oft und skalierbar stofflich speichern. Nach dem Power-to-X-Konzept (P2X) kann H<sub>2</sub> in flüssige (L), gasförmige (G) und feste Formen (F) und Derivate (Ammoniak, Methanol, Methan, LOHC, Hydridspeicher, E-Fuels) umgewandelt, gespeichert und transportiert werden. Er kann dabei reversibel an dieselben Elemente binden, die die Natur zur stofflichen Energie-Speicherung verwendet (C, O, N). Wasserstoff kann in allen Sektoren von der Stromwirtschaft und Netzstabilisierung, Verkehr, Haushalt und Industrie zur Energiegewinnung eingesetzt werden. Stofflich kann er zudem als Reduktionsmittel in der Metallindustrie und zur Herstellung von E-Fuels, chemischen Grundstoffen und Düngemittel eingesetzt werden. Da er verschiedene Sektoren, insbesondere die stoffliche und energetische Welt verknüpft, wird er auch als Sektor-Koppler bezeichnet. Wie fälschlicherweise oftmals angenommen, ist Wasserstoff nicht Konkurrenz zur Elektrifizierung mit der Batterietechnologie, sondern ergänzt sie und macht sie in vielen Bereichen durch hybride Kombination erst möglich.

Eine wichtige Voraussetzung für die vollständige Klimaneutralität einer weltweiten Wasserstoff-Wirtschaft ist die Verwendung von grünem Wasserstoff, der ausschließlich durch regenerative Energie und damit CO<sub>2</sub>-neutral gewonnen wird. Damit verbunden ist die Herausforderung genügend Wasserstoff auf diese Weise herzustellen und entsprechende Lagerungs- und Transportkapazitäten zu schaffen. Es werden hier große Chancen für den Aufbau deutscher Industriekompetenz zur Wasserstoff-Wirtschaft gesehen, um eine klimaneutrale Zukunft sicherzustellen.

In Augsburg existiert ein interdisziplinärer Verbund von Lehrstühlen und Arbeitsgruppen, um die Expertise und den Austausch hinsichtlich der Forschung zu relevanten Themen der Wasserstofftechnologie zu bündeln und um einen wesentlichen Beitrag zur Umsetzung der Energiewende und der Europäischen, Nationalen und Bayerischen Wasserstoff-Strategie und Klima-Allianz zu leisten. Die Mathematisch-Naturwissenschaftlich-Technische Fakultät der Universität umfasst Expertisen zu Materialsynthesen / -charakterisierungen, Monitoring, Simulationen, Prozeß-Entwicklungen, Gasreaktionen / -separation, und u.a. deren Adaptierung an KI. Das H<sub>2</sub>.UniA-Netzwerk bearbeitet hierbei die wichtigsten Wasserstoff-Themenbereiche „Er-

zeugung“, „Speicherung & Transport“, sowie „Anwendungsbezogene Nutzung“ adressieren. (Abb. 3)

Es besteht eine branchenübergreifende Vernetzung mit Industriepartnern um die Umsetzung modernster Technologien im industriellen Maßstab zu begleiten. Dies beinhaltet auch eine enge Kooperation mit dem bifa Umweltinstitut GmbH Augsburg, das seit mehr als 30 Jahren als anwendungsorientierte Forschungs-, Entwicklungs- und Beratungseinrichtung ein breitgefächertes Leistungsspektrum rund um den „Technischen Umweltschutz“ repräsentiert. Zu erwähnen ist hier auch das KUMAS – Kompetenzzentrum Umwelt e.V., das neben wirtschaftlichen Aspekten und dem Ausbau des Umweltkompetenzentrums Augsburg, das Augenmerk auf die Sicherung und Verbesserung der regionalen Umweltqualität in Bayerisch-Schwaben und Bayern legt, indem Projekte im Umwelt- und Naturschutz aktiv unterstützt werden.

#### Autoren:



Prof. Dr.  
Richard Wehrich  
Institut für Materials  
Resource Management (MRM)

Universität Augsburg  
Am Technologiezentrum 8  
D-86159 Augsburg (Germany)  
E-mail: richard.wehrich@mrm.uni-augsburg.de  
Tel.: +49 821 598 69131  
Tel. +49 821 598 69100 (Sekr.)  
Mobil +49 151 68813093



Dr. Michael Heine  
CME Carbon  
Materials  
Engineering

E-Mail:  
michael.heine@composites-uni-augsburg.de  
Tel. +49 8273 9945306  
Mobil: +49 171 4740710

# DIE WOCHE DES WASSERSTOFFS 2023

Längst sind sich Expert:innen einig: Der größte Transferprozess unserer Zeit – die Energiewende – wird nur mit dem kleinsten uns bekannten Element gelingen: Wasserstoff. Denn der Energieträger mit der Abkürzung H2 wird benötigt, um ausreichend saubere Sonnenenergie zu importieren und zu speichern, Erdgas zu ersetzen, Stahl zu schmelzen, Pflanzen zu düngen und auch um Fahrzeuge anzutreiben.

Um Wasserstoff und seine vielfältige Anwendbarkeit bekannter sowie Diskurs möglich zu machen, lädt jährlich die WOCHE DES WASSERSTOFFS (WDW) zu Vorträgen, Expertengesprächen, Live-Streams, Filmen, Werks- und Laborführungen, zu Marktplatzveranstaltungen und Probefahrten ein. 2023 findet die WDW vom 10.-18. Juni zum fünften Mal mit dem Schwerpunktthema Wasserstoffmobilität in ganz Deutschland statt. Bereits 2022 konnte man sich bei über 120 Veranstaltungen in 56 Städten und Kreisen informieren.

Initiatorin der WDW ist die H2 MOBILITY Deutschland. Dass es sich bei dem Unternehmen um den weltweit größten Wasserstofftankstellenbetreiber handelt, kommt dem Schwerpunkt in diesem Jahr zugute. Unter anderem gemeinsam mit diversen Fahrzeugherstellern bieten Veranstaltungen und Fahrtage Einblick in Wasserstoff als Kraftstoff, der sich vergleichbar zu Benzin und Diesel in wenigen Minuten für gewohnte Reichweiten und ohne Einschränkung bei der Zuladung tanken lässt.



© H2M/JACKZ Productions ■

Für eine erfolgreiche Mobilitätswende werden sowohl Wasserstoff als auch Batterien gebraucht. Sicher ist aber, dass immer dann, wenn Zeit, Reichweite und/oder Zuladung „erfolgskritisch“ sind, Wasserstoff die bessere der sauberen Antriebslösungen ist.



© H2M/JACKZ Productions ■

Dass dies vor allem bei Logistikern sowie im öffentlichem Nahverkehr angekommen ist, zeigt der schnelle Hochlauf von Wasserstoffnutzfahrzeugen – Wasserstoff-Busse, Transporter, Müllsammelfahrzeuge und Lkw. Aber auch für Wasserstoff-Pkw sehen Zukunftsforscher Bedarf, nämlich immer dann, wenn keine Zeit oder kein Raum zum Laden ist oder wenn das Stromnetz für eine

umfangreiche Ladeinfrastruktur nicht ausreicht.

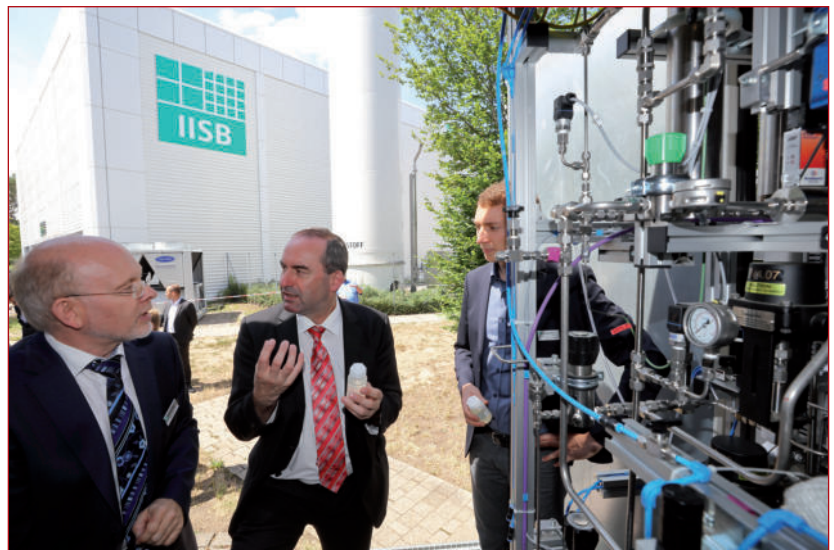
Für alle – sowohl für die wachsende Zahl der Nutzfahrzeuge als auch für den Wasserstoff-Pkw – errichtet H2 MOBILITY eine öffentliche Tankinfrastruktur. Schon heute kann man in Deutschland an 95 öffentlichen Wasserstofftankstellen tanken. Damit ist Deutschland Europameister. H2 MOBILITY baut das Wasserstofftankstellennetz nachfrageorientiert weiter aus. Vor allem da, wo kurzfristig große Wasserstoffbedarfe durch Nutzfahrzeuge oder größere Flotten zu erwarten sind und wo es ausreichend grünen, regenerativ produzierten H2 gibt, baut die Infrastrukturbetreiberin neu. Wo genau, können Interessierte unter [www.h2.live](http://www.h2.live) sehen. Während der WDW wird es auch möglich sein einzelne Wasserstofftankstellen zu besichtigen und sich hier mit Expert:innen auszutauschen. ■

Mehr Informationen zur WDW, auch für potenzielle Partner und Akteure, findet man unter [www.woche-des-wasserstoffs.de](http://www.woche-des-wasserstoffs.de).

# Europäische Metropolregion Nürnberg – fruchtbarer Boden für eine nachhaltige Wasserstoffwirtschaft

Die Nutzung von Wasserstoff für Energiespeicher- und Transportzwecke ist keine neue Erfindung. Das erste systematisch geplante Projekt war das sog. "Euro-Quebec Hydro-Hydrogen"-Pilotprojekt von 1989 bis 1992, an dem auch die Region um Nürnberg beteiligt war. Aufgrund der schwierigen Rahmenbedingungen wurden allerdings nur Teilprojekte realisiert. Hierzu gehörte die Entwicklung eines Wasserstoffmotors für Nutzfahrzeuge sowie der erste wasserstoffbetriebene Stadtlinienbus in Erlangen Anfang der 90er Jahre. Die Projekte bildeten den Keim für spätere Wasserstoff- und Brennstoffzellenanwendungen bis hin zu den Power-to-Gas-Konzepten der jüngsten Zeit.

Die Studie "Wasserstoff in der Metropolregion Nürnberg - Analyse der Kompetenzen, Chancen und Herausforderungen" vom Dezember 2022 zeigt, dass die Region das Potenzial hat, zum Innovationszentrum für Wasserstoff-Technologien zu werden. Die Studie untersucht sowohl die energetische Wertschöpfungskette, die die Erzeugung, den Transport, die Lagerung, Verteilung und direkte energetische Verwertung von Wasserstoff umfasst, als auch die produktbezogene Wertschöpfungskette, die sich mit der Herstellung, dem Vertrieb und den Dienstleistungen im Zusammenhang mit der Nutzung von Wasserstofftechnologien beschäftigt. Obwohl die Region in der energetischen Wertschöpfungskette besonders beim Speicher- und Elektrolysepotenzial punktet, wird sie laut den meisten Szenarien weder eine Wasserstoff-Exportregion noch eine Großverbraucherregion sein. Es wird einen Bedarf an Wasserstoff als Energieträger in der Metropolregion Nürnberg geben, jedoch wird dieser Markt eine untergeordnete Rolle spielen. Im Gegensatz dazu hat die Region in der produktbezogenen Wertschöpfungskette



Bayerns Wirtschaftsminister und Stellvertretender Ministerpräsident Hubert Aiwanger (Mitte), Prof. Martin März, Direktor Leistungselektronik am Fraunhofer IISB (links) und IISB-Wissenschaftler Johannes Geiling diskutieren am Forschungsstandort Erlangen Aspekte der Langzeitspeicherung von regenerativ erzeugter Energie mittels Wasserstoff und organischer Trägerflüssigkeiten (LOHC). Foto: Kurt Fuchs ■

te das Potenzial, zum Innovationszentrum für die Entwicklung und Vermarktung spezifischer Wasserstoffschlüsseltechnologien zu werden. Schon heute sind 150 Wasserstoff-Akteure in der Region tätig, darunter 70 Unternehmen, und bis 2030 besteht ein Wachstumspotenzial von 2000 bis 8000 neuen Arbeitsplätzen. Die technologischen Kernkompetenzen der Region konzentrieren

sich auf Elektrolyse-Anlagen, Wasserstoff-Speicher (LOHC) und Brennstoffzellen (stationär und mobil). Zudem verfügt die Region über komplementäre Wirtschaftszweige wie Maschinenbau, Verfahrenstechnik oder Industrial IoT, die schnell ihr Angebot an den Hochlauf von Wasserstofftechnologien anpassen und wichtiges Know-how beitragen können. Darüber hinaus punktet die

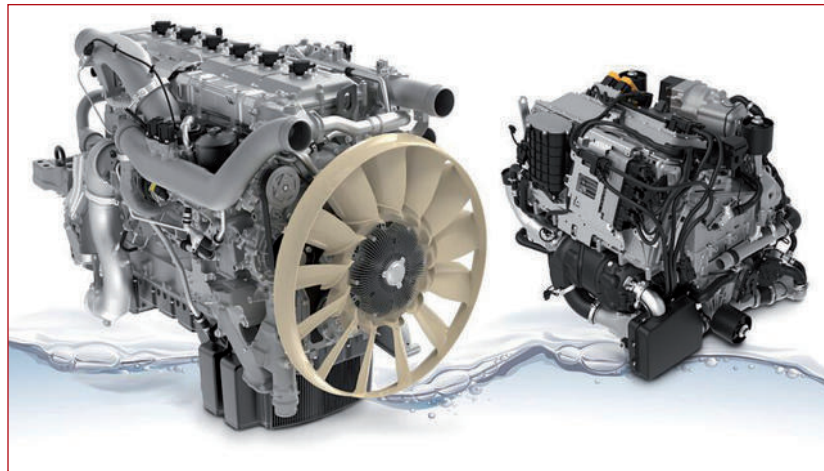


Metropolregion Nürnberg mit 14 Forschungseinrichtungen, Universitäten und Hochschulen, die Spitzenforschung im Bereich Wasserstoff betreiben.

Im Jahr 2019 erhielt die Region einen wichtigen Impuls durch die Ansiedlung des Zentrums Wasserstoff.Bayern (H2.B) beim Energie Campus Nürnberg. Das H2.B ist zudem Träger des Wasserstoffbündnis Bayern, in dem führende Unternehmen und Forschungseinrichtungen zusammenarbeiten, um die Technologie voranzutreiben. Das Bündnis spielte eine entscheidende Rolle bei der Entwicklung der bayerischen Wasserstoffstrategie und der bayerischen Wasserstoff-Roadmap. Ein weiteres Ziel des Bündnisses ist die Koordination großer industrieller Demonstrationsprojekte. Auch die bayerischen Industrie- und Handelskammern (IHKs in Bayern) sind Partner im Wasserstoffbündnis und konnten bei der H2-Strategie ihre Expertise einbringen.

Erste Wasserstoffprojekte in der Europäischen Metropolregion Nürnberg zeigen vielversprechende Chancen auf. Die größte Elektrolyseanlage Bayerns in Wunsiedel setzt auf Technologie von Siemens Energy aus Erlangen und spaltet Wasser mit Hilfe von Wind- und Sonnenkraft in Sauer- und Wasserstoff auf. Letzterer wird in die Industriehallen von Autozulieferern und Metallverarbeitern geleitet oder der Stromerzeugung zugeführt.

In der Region hat sich rund um den Energie Campus Nürnberg (EnCN) und das Helmholtz Institut Erlangen-Nürnberg für Erneuerbare Energien (HIERN) ein Spitzenforschungs- und Entwicklungs-Cluster gebildet. Besonders im Fokus steht die Wasserstoffspeicherung in Flüssigkeiten, auch bekannt als Liquid Organic Hydrogen Carriers (LOHCs). Diese Technologie bietet neue Ansätze für die Wasserstofflogistik sowie für stationäre und mobile Anwendungen. Ein großer Vorteil von LOHC ist, dass Wasserstoff mit diesem Verfahren ähnlich



Der Lkw-Hersteller MAN will ab dem Jahr 2023 Prototypen-Fahrzeuge mit Wasserstoff-Verbrennungsmotor und Brennstoffzelle testen. Foto: MAN ■

wie Benzin transportiert sowie gelagert und somit die bestehende Infrastruktur genutzt werden kann. Hydrogenious, ein Spin-off der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU), vermarktet die LOHC-Technologie weltweit.

Das Fraunhofer-Institut für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie (IISB) in Erlangen hat bereits vor einigen Jahren die wichtigsten Komponenten für ein LOHC-Wasserstoffkraftwerk in einen Container gepackt und dessen Funktionsweise gezeigt.

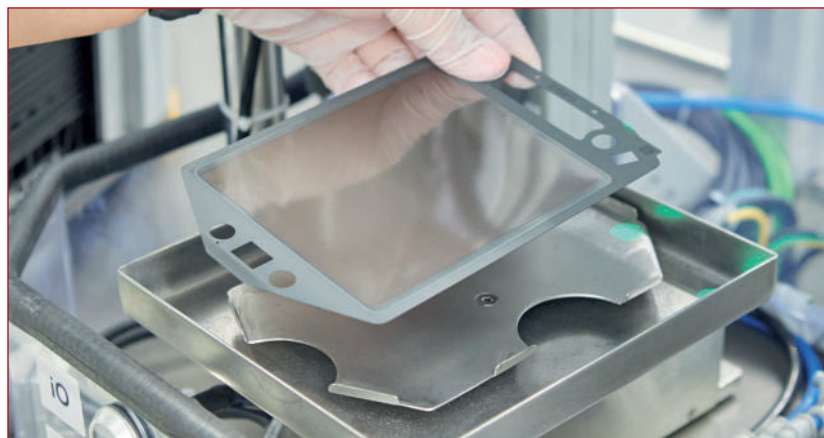
Ein Energiespeicher auf Basis der LOHC-Technik ist zugleich die Schlüsselkomponente eines geplanten Wasserstoff-Kraftwerks, mit dem die NürnbergMesse bis zum Jahr 2028 klimaneutral werden will. Die Ambitionen spiegeln sich im Messe- und Eventprogramm: Mit dem jährlichen „Hydrogen Dialogue“ bringt

die Nürnberg Messe Entscheider und Experten aus Wirtschaft, Politik und Wissenschaft entlang der gesamten Wertschöpfungskette der Wasserstoffwirtschaft zusammen.

Ein weiteres regionales Unternehmen, das sich auf Wasserstoff-Speicher spezialisiert hat, ist PS-HyTech aus Burghaslach. Das Unternehmen entwickelt Wasserstoff-Druckspeicher, die aus faserverstärkten Kunststoffen hergestellt werden.

Rückgrat für die Wasserstoff-Mobilität in der regionalen Wirtschaft sind die traditionell starken Unternehmen aus den Bereichen Automobilzulieferer und Motorenbau.

So haben MAN Truck & Bus, die FAU und die Technische Hochschule Nürnberg (THN) eine Kooperationsvereinbarung zur Forschung und Entwicklung von wasserstoffbasierten Fahrzeugantrieben geschlossen. Die jeweiligen Kompetenzen der



Fertigung von Festoxid-Brennstoffzellen am Bosch-Standort in Bamberg: Prüfung einer fertig prozessierten Festoxid-Brennstoffzelle. Foto: Bosch ■



Prof. Dr.-Ing. Tim Hosenfeldt, Schaeffler AG, mit metallischer Bipolarplatte für die Wasserstofftechnologie. Foto: Kurt Fuchs ■

Partner spielen dabei ideal zusammen: Die FAU wird sich auf Grundlagenforschung konzentrieren, die THN wird ihre anwendungsnahen Forschungsstärken einbringen und MAN wird die Forschungsergebnisse in Lkw und Busse mit Wasserstoff-Brennstoffzellen und -Verbrennungsmotoren umsetzen.

Das Nürnberger Werk des globalen Zulieferers Robert Bosch GmbH ist mit seinen knapp 2000 Beschäftigten eigentlich ein klassischer „Verbrenner-Standort“. Für die Zukunft ist aber eine Doppelstrategie vorgesehen: Einerseits werden die Komponenten für die Benzineinspritzung weiterentwickelt, um Kraftstoffverbrauch und Emissionen weiter zu senken. Andererseits macht sich Nürnberg fit für die Zukunft im Bereich des Brennstoffzellensystems und der Wasserstofftechnik. Hier geht es um die sogenannte Vorindustrialisierung von Ventilen für die Brennstoffzelle sowie um eine Magnetbaugruppe für ein Wasserstoffventil.

Weiter hat Bosch angekündigt, im Jahr 2024 am Standort Bamberg mit der Serienfertigung von stationären Brennstoffzellensystemen zur Energiegewinnung beginnen zu wollen. Diese sog. Festoxid-Brennstoffzelle gilt als ein möglicher Baustein für nachhaltige Energiegewinnung in der Zukunft und kann für eine vernetzte, dezentrale Energieversorgung zum Beispiel von Städten,

Fabriken, Rechenzentren oder Ladeparks von Elektro-Fahrzeugen dienen.

Auch die Schaeffler AG in Herzogenaurach entwickelt Produkte und Lösungen für die Wasserstofftechnologie. Ein Beispiel ist eine metallische Bipolarplatte mit einer nanostrukturierten Beschichtung, die eine entscheidende Komponente für die Brennstoffzelle darstellt. Die Bipolarplatten werden gestapelt, um Stacks zu bilden, an denen die Energieumwandlung stattfindet und Wasserstoff und Sauerstoff zu Wasser reagieren. Durch ihre einzigartigen Funktionalitäten und Materialien hat Schaeffler AG ein Alleinstellungsmerkmal auf diesem Gebiet.

In Bayern gibt es regionale Cluster, die sich auf die Förderung von Wasserstoff- und Elektromobilität konzentrieren, darunter die Bayern Innovativ GmbH, der EnergieRegion Nürnberg e.V. mit dem Projekt "Wasserstoff-Metropolregion Nürnberg hy+" und der Center for Transportation and Logistics Neuer Adler e.V. (CNA). Die IHK Nürnberg für Mittelfranken organisiert seit 2013 zusammen mit den IHKs in Bayreuth, Coburg, Regensburg und Würzburg-Schweinfurt IHK-Innovations- und AnwenderClub "eMobilität" und schafft damit Kooperationsmöglichkeiten und Wissensaustausch zwischen regionalen Anbietern, Anwendern und Entwicklern. Um dem Austausch mehr Themen-

vielfalt, Praxisnähe und Reichweite zu geben, haben die fünf genannten IHKs auch einen eigenen IHK-AnwenderClub "Wasserstoff | H<sub>2</sub>" ins Leben gerufen. Bei den 'Hydrogen Dialogues' 2020, 2021 und 2022 der NürnbergMesse engagierten sich die bayerischen IHKs unter Nürnberger Federführung als Aussteller und Plattform-Bereitsteller. In der bundesweiten Datenbank IHK-ecoFinder werden auf Nürnberger Initiative hin auch Profile von Akteuren der Wasserstoffwirtschaft und -Wissenschaft aufgenommen, um die Markttransparenz in diesem Themenbereich zu erhöhen.

Interessierte Einrichtungen können sich kostenfrei eintragen unter [www.ihk-ecofinder.de](http://www.ihk-ecofinder.de).



Autoren:



Dr.-Ing.  
Robert Schmidt



Dr. rer. nat.  
Ronald Künneth

Industrie- und Handelskammer (IHK)  
Nürnberg für Mittelfranken  
Geschäftsbereich  
Innovation|Umwelt

Hauptmarkt 25/27  
D-90403 Nürnberg  
E-Mail: [giu@nuernberg.ihk.de](mailto:giu@nuernberg.ihk.de)  
[www.ihk-nuernberg.de](http://www.ihk-nuernberg.de)

# Grüner Wasserstoff als Energieträger für die Luftfahrt – Status, Herausforderungen und Perspektiven

Das weltweite Bestreben den durch den Anstieg der Durchschnittstemperaturen bedingten Klimawandel zu begrenzen<sup>1</sup> erfordert Anstrengungen aller Sektoren. Auch die Luftfahrtindustrie hat sich ambitionierte Ziele<sup>2,3</sup>, gesetzt, welche eine wesentliche Emissionsreduktion und vollständige Dekarbonisierung (i.e. netto-null CO<sub>2</sub>-Emissionen) bis 2050 vorsehen. Die Erreichung dieses Vorhabens stellt einen enormen Kraftakt dar und kann nur durch rigorose Kombination weitreichender Emissionsreduktionsmaßnahmen erwirkt werden. Neben technischen Effizienzsteigerungen und der Optimierung operationeller

Aspekte wie etwa die Vermeidung von ungenutzten Sitzplätzen oder Zwischenlandungen, stellt der Umstieg auf nachhaltigere Energieträger einen wesentlichen Hebel dar. Dieser wirkt in gewisser Weise zweifach: Zum einen sind Art und Menge der während des Fluges ausgestoßenen Emissionen von fundamentaler Bedeutung für die Klimawirkung, zum anderen ist es essentiell, die Produktion und Bereitstellung des Energieträgers möglichst nachhaltig zu gestalten und somit eine vorteilhafte Umweltbilanz zu erzielen. Die Renewable Energy Directive der Europäischen Union<sup>4</sup> sieht hierbei Reduktion von mindestens

70% gegenüber fossilem Kerosin vor.

Im Kontext nachhaltiger Energieträger kommt dem grünen Wasserstoff eine Schlüsselrolle zu. Dieser kann mittels Elektrolyse mit vergleichsweise hoher Effizienz und geringem Umwelteinfluss aus erneuerbaren Energien und Wasser produziert werden, bietet die Möglichkeit der Anwendung in verschiedenen Industrien und bildet zudem die Grundlage für die Herstellung vieler anderer chemischer Produkte sowie Kraftstoffe. Das Potential und wesentliche Ziele für den sektorübergreifenden Einsatz wurde bereits auf nationaler<sup>5</sup>, europäischer<sup>6</sup> sowie



Visualisierung dreier Konzepte für wasserstoffbetriebene Flugzeuge in verschiedenen Marktsegmenten – von regionalen Flügen (hinten) bis zur Langstrecke (vorne). ©Bauhaus Luftfahrt ■

bayerischer<sup>7</sup> Ebene in Strategiepapieren festgehalten.

Auch in der Luftfahrt stellt grüner Wasserstoff einen wichtigen Baustein für die Erreichung obengenannter Klimaziele dar. Dabei wird er nicht nur als Ausgangsstoff für die Herstellung synthetischer Kerosine mit hohem Emissionsreduktionspotential benötigt, sondern auch als spannende Zukunftsoption für den direkten Einsatz als Energieträger an Bord diskutiert. Dies ist – neben der nachhaltigen Herstellungsweise – vor allem durch den Wegfall kohlenstoffbasierter Verbrennungsprodukte wie Rußpartikel und CO<sub>2</sub> motiviert, aber mit zahlreichen Herausforderungen verbunden, welche sich aus den von Kerosin fundamental verschiedenen Eigenschaften dieses Energieträgers ergeben. Neben der hohen Flüchtigkeit und des gasförmigen Zustands bei Standardbedingungen, ist hier vor allem die geringe volumetrische Energiedichte zu nennen. Bei hohen Drücken von 700 bar kann diese zwar signifikant vergrößert werden, ist aber dennoch auf ca. 1/7 von Kerosin limitiert – dazu kommt ein erhöhtes Tankgewicht. Eine Bedruckung von Wasserstoff reicht somit für den Einsatz in Passagierflugzeugen nicht aus (Ausnahmen stellen hier nur sehr kleine Vehikel wie Flugtaxi dar). Daher muss auf verflüssigten Wasserstoff zurückgegriffen werden, eine kryogene Flüssigkeit mit Temperatur  $\leq 253^\circ\text{C}$ . Um letztere beibehalten zu können unterscheiden sich die Flüssigwasserstoffspeicher drastisch von den herkömmlichen, im Flügel integrierten Kerosintanks: Sie benötigen eine aufwendige Wärmeisolation und müssen daher meist zylindrisch oder gar kugelförmig ausgeführt werden. Ihre Integration ist daher meist im Rumpf vorgesehen, was zu größeren Rumpfvolumina und -

längen und im Ergebnis zu höheren Luftwiderständen führt.

Um diese intrinsischen Nachteile von direkter Wasserstoffnutzung zu kompensieren, ist es von essentieller Bedeutung alle sich daraus ergebenden Möglichkeiten auszuschöpfen. Das Bauhaus Luftfahrt e.V. erforscht dazu seit geraumer Zeit verschiedenste Ansätze und hat unter anderem kürzlich auf der ILA 2022 (Innovation and Leadership in Aerospace) drei Konzeptvorschläge für wasserstoffbetriebene Flugzeuge präsentiert. Ein wesentliches Element ist hierbei der langgestreckte Flügel: Da, wie beschrieben, der Kraftstoff im Rumpf und nicht wie konventionell im Flügel gelagert wird, wird der Designraum des letzteren wesentlich vergrößert – mit gestreckten Geometrien und einer hochflexiblen Auslegung können hier signifikante aerodynamische Vorteile erzielt werden. Ebenso ermöglicht die Nutzung von Wasserstoff auch den Einsatz von in der Luftfahrt zuvor nicht zur Anwendung gekommenen Energiewandler: Brennstoffzellen wandeln chemische zu elektrischer Energie, welche an Bord für die Versorgung der Subsysteme, oder auch für den Antrieb genutzt werden kann. Je nach Leistungsklasse und Betriebspunkt, können im Vergleich zur Gasturbine hohe Effizienzen erzielt werden. Allerdings bringen diese elektrochemischen Vorrichtungen auch ein höheres Gewicht mit an Bord und sind aktuell in ihren Systemgrößen limitiert. Um Vorteile beider Technologien zu nutzen sind verschiedenste synergistische Kombinationen aus Gasturbine und Brennstoffzelle möglich. Auch verteilte Antriebsauslegungen werden untersucht: beispielsweise wirkt ein grenschichtensaugender Fan am Heck des Flugzeuges effizienz erhöhend und kann insbesondere

den aerodynamischen Nachteilen eines vergrößerten Rumpfes effizient entgegenwirken. Erste Analysen des Bauhaus Luftfahrt e.V. zeigen, dass Wasserstoff auf allen Marktsegmenten denkbar ist. Aufgrund der großen Breite an Anwendungsfällen und Leistungsanforderungen – von Maschinen für wenige Passagiere und kurze Strecken bis hin zu großen Langstreckenflugzeugen – wird es aber entscheidend sein, jeweils die bestgeeignete Kombination der verschiedenen Technologiebausteine einzusetzen.

Nicht nur im Flugzeug- und Antriebsdesign sind interdisziplinäre und innovative Lösungsansätze gefragt um den Weg für Flüssigwasserstoff als Energieträger der Luftfahrt freizumachen. Besonders beim Transport, sowie bei der am Flughafen benötigte Verteil- und Tankinfrastruktur, bedarf es der (Weiter)entwicklung diverser technologischer Schlüsselkomponenten wie Krypumpen und Flüssigwasserstoffleitungen zu erhöhen. Hier gilt es, die Distributions- und Speicherlösung dem jeweiligen Anwendungsfall anzupassen, also beispielsweise anhand der Flughafengröße, der benötigten Wasserstoffmenge und der Turnaround- und Abläufe zu optimieren – komplexe Zusammenhänge, welche am Bauhaus Luftfahrt e.V. mittels Modellierung in Angriff genommen werden. Um auch den durch Verdampfung wieder gasförmig gewordenen Wasserstoff zu nutzen, ist es sinnvoll den Energieträger auch für den Betrieb am Boden oder die Gebäudeversorgung mit Strom und Wärme einzusetzen. Sicherheitsaspekte im Umgang mit Wasserstoff am Flughafen sind dabei stets mitzudenken.

Neben den technologischen Herausforderungen zur Ermöglichung des Wasserstofffliegens bestehen noch Unsicherheiten hinsichtlich des Treibhauseffekts

der Emissionen auf Reiseflughöhe. Während der Wegfall von Rußpartikeln einen klaren Vorteil darstellt, so ist es für ein sicheres Verständnis der Gesamtklimawirkung eines als Energieträgers in der Luftfahrt unumgänglich, auch den Effekt der Kondensstreifen und Wolkenbildung sowohl für konventionelle Flugzeuge als auch für Wasserstoffflugzeuge weiter aufzuklären. Frühe Modellrechnungen<sup>8</sup> deuten allerdings darauf hin, dass Wasserstoffflugzeuge auf den für aktuelle Zivilflugzeuge typischen Reiseflughöhen eine geringere Klimawirkung aufweisen.

Zusammenfassend lässt sich ein erheblicher Forschungs- und Entwicklungsaufwand feststellen. Zudem benötigt es einen wesentlichen Ausbau an Produktions- und Distributionskapazitäten für grünen Wasserstoff. Um das Potential dieses nachhaltigen Energieträgers zu heben, bedarf es daher eines Zusammenspiels verschiedenster Akteure. Eine erfolgreiche Einführung und Transformationsphase in der Luftfahrt bedarf demnach ein Mitwirken von Flughäfen, Airlines, Flugzeugherstellern, und Zulieferern aber auch breiteren Einsatz von anderen Sektoren, Politik, Forschung und Gesellschaft. Unter Berücksichtigung der genannten Faktoren, sowie

der in der Luftfahrt üblichen zeitintensiven Designzyklen, ist ersichtlich, dass es sich bei grünem Wasserstoff als eine spannende Alternative mit Emissionsreduktionspotential handelt, welche längerfristig einen großen Beitrag liefern könnte.

- 1 Paris Agreement, available online: [https://climate.ec.europa.eu/eu-action/international-action-climate-change/climate-negotiations/paris-agreement\\_en](https://climate.ec.europa.eu/eu-action/international-action-climate-change/climate-negotiations/paris-agreement_en), accessed 31.1.2023
- 2 Waypoint 2050 2nd Edition, available online: <https://aviationbenefits.org/environmental-efficiency/climate-action/waypoint-2050/>, accessed 31.1.2023
- 3 Fly Net Zero, available online: <https://www.iata.org/en/programs/environment/flynetzero/>, accessed 31.1.2023
- 4 Renewable Energy Directive, available online: [https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive-targets-and-rules/renewable-energy-directive\\_en](https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive-targets-and-rules/renewable-energy-directive_en), accessed 31.1.2023
- 5 Nationale Wasserstoffstrategie, available online: [https://www.bmbf.de/bmbf/de/forschung/energiewende-und-nachhaltiges-wirtschaften/nationale-wasserstoffstrategie/nationale-wasserstoffstrategie\\_node.html](https://www.bmbf.de/bmbf/de/forschung/energiewende-und-nachhaltiges-wirtschaften/nationale-wasserstoffstrategie/nationale-wasserstoffstrategie_node.html), accessed 31.1.2023
- 6 A Hydrogen Strategy for a Climate Friendly Europe, available online: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020DC0301>, accessed 31.1.2023.
- 7 Bayerische Wasserstoffstrategie, available online: <https://www.stmwi.bayern.de/energie/energiewende/wasserstoffstrategie/>, accessed 31.1.2023
- 8 Ponater M. et al., 2006, Atmospheric Environment, 40, 6928-6944.

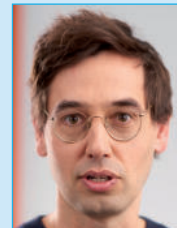
**Autor\*innen:**



**Dr. Kathrin Ebner**  
Kathrin.Ebner@bauhaus-luftfahrt.net



**Dr. Arne Seitz,**  
arne.seitz@bauhaus-luftfahrt.net



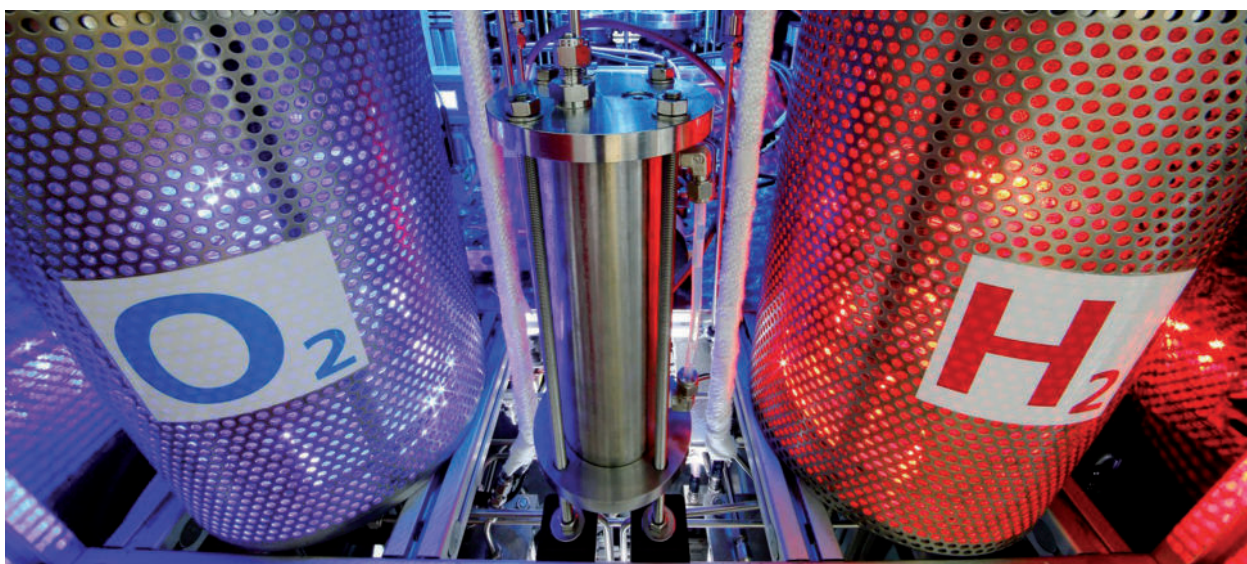
**Dr. Valentin Batteiger**  
valentin.batteiger@bauhaus-luftfahrt.net



**Fabian Peter**  
fabian.peter@bauhaus-luftfahrt.net

**Kontakt:**

**Bauhaus Luftfahrt e. V.**  
Willy-Messerschmitt-Str. 1  
82024 Taufkirchen  
Germany  
[www.bauhaus-luftfahrt.net](http://www.bauhaus-luftfahrt.net)





# Der Augsburg Innovationspark mit dem Technologiezentrum Augsburg

## Wasserstoffkompetenzen und noch mehr

Der **Augsburg Innovationspark** mit dem **Technologiezentrum Augsburg** ist eine Wirtschaftsfördermaßnahme der Stadt Augsburg und des Landkreises Augsburg, die vom Freistaat Bayern unterstützt wird.

Ziel ist es, Innovationen und Technologietransfer für Unternehmen in den Bereichen Wasserstofftechnologie, Luft- und Raumfahrt, Leichtbau, Faserverbund, Mechatronik & Automation, Digitalisierung, Künstliche Intelligenz, Industrie 4.0, Umwelttechnologie und Ressourceneffizienz zu unterstützen.

Diese verschiedenen Bereiche ergänzen sich dabei hervorragend. Ein Beispiel: Wasserstofftanks für Flugzeuge werden aus Carbonfaser-Materialien mit Robotern auf KI-gesteuerten Produktionsanlagen gefertigt. Durch unsere Verknüpfung der Wissensquellen (Universität, Hochschule, Institute, Startups...) mit den Unternehmen gelingt es, das Know-How der Wissensquellen sehr schnell in die industrielle Produktion überzuführen.

Im 70 ha großen Innovationspark können sich Technologieunternehmen ansiedeln oder als Projektgruppe im 12.000 m<sup>2</sup> großen Technologiezentrum Augsburg mit Forschungseinrichtungen eng zusammenarbeiten, um Produktionsprozesse und Produkte zu verbessern. 50 Nutzer wie Forschungsinstitute, Startups, regionale Unternehmen und Global Player sind bereits vor

Ort und beschäftigen über 1000 Fachkräfte.

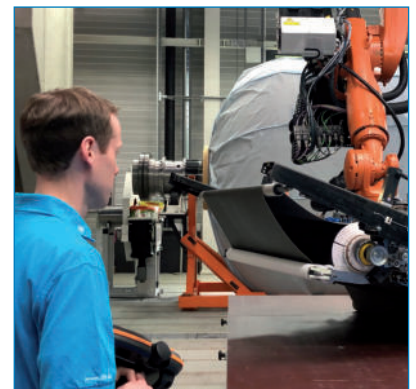
Die **Wasserstofftechnologie** hat für den Augsburg Innovationspark eine zentrale Bedeutung auf Grund der enormen und notwendigen globalen Relevanz und der damit verbundenen Marktchancen, die wir mit den Kompetenzen des Innovationspark insgesamt sehr gut bedienen.

### Beispielhafte H<sup>2</sup>-Kompetenzen im Augsburg Innovationspark

- **DLR SG:** H<sup>2</sup> in Turbinenanwendung, Test und Simulationen
- **DLR ZLP:** Leichtbaustruktur-Produktionsverfahren bis zur Industriereife, z.B. H<sup>2</sup>-Tankstrukturen
- **Fraunhofer IGCV:** Composite Materials und Prozessautomation
- **AMU mit H2.UniA:** interdisziplinärer H<sup>2</sup>-Verbund von Lehrstühlen und Arbeitsgruppen
- **Material Resource Management Institut:** Technologieentwicklung, Sensorik, Materialaspekte, Analysen, Digitalisierung, KI
- **FZG:** Entwicklung von Getrieben für H<sup>2</sup> Antriebsstränge
- **Composites United, MAI Carbon:** Cluster für Carboncomposites. Anwendung in verschiedenen H<sup>2</sup>-Bereichen, Bildung, Vernetzung und Projekte
- **CMA:** Cluster für Mechatronik

und Automation. Vernetzung, Bildung, Projekte

- **KUMAS:** Cluster, u.a. im H<sup>2</sup>-Bereich aktiv mit Datensammlung, Information, Sensibilisierung, Bewertung, Moderation, Vernetzung, Bildung
- **Bavaria Hydro:** Wasserstoff-Projektentwickler
- **H-TECH SYSTEMS:** Hersteller H<sup>2</sup>-Großelektrolyseure
- **AdvanTec:** Experimentalflugzeug mit E-Antrieb auf dem Weg zum Brennstoffzellenantrieb
- **Coriolis:** Entwicklung und Produktion von Druckgasspeichern aus Carbonfasern, Roboterproduktionstechnologie
- **3D-MT:** CT-Meßtechnik für Strukturen der H<sup>2</sup> Technik
- **Solvay:** Membran-Elektrodeneinheiten
- **Evobay:** Bipolarplatten-Beschichtungsmaschinen. Entwicklung und Bau
- **Audiatec:** Wasserstoffverbraucher



Tankproduktion mit Robotern  
Foto: © Wolfgang Hehl ■



Wasserstofftank aus Carbon, Foto: © Wolfgang Hehl ■

Wir sind Mitglied im Wasserstoffbündnis Bayern



WASSERSTOFF  
BÜNDNIS.  
**BAYERN**

**Kontakt:**

Augsburg Innovationspark GmbH  
Wolfgang Hehl  
Geschäftsführer  
Am Technologiezentrum 5  
86159 Augsburg  
T +49(0)821 80 90 30 60  
wolfgang.hehl@augzburg-innovationspark.com  
www.augszburg-innovationspark.com

# Mit KI zum sicheren H2-Druckbehälter

*Das Institut für Materials Resource Management der Universität Augsburg verfügt über eine weltweit einzigartige Expertise in der Schallemissionsmessung. Aktuell ist die Einbindung von KI zur Ortung, Klassifizierung und Prognostizierung von Bruchvorgängen.*

Wenn man von Wasserstoff als dem Kraftstoff der Zukunft spricht, müssen zwei Fragen geklärt sein: Wie können H<sub>2</sub>-Druckbehälter erstens ressourcenoptimiert und zweitens anwendungssicher hergestellt werden? An der Universität Augsburg forscht das Institut für Materials Resource Management (MRM) seit mehreren Jahren an diesem Thema.

Mittels Sensoren in Kombination mit Algorithmen der künstlichen Intelligenz können selbst kleinste Bruchvorgänge in Druckbehältern aus carbonfaserverstärktem Kunststoff geortet, klassifiziert und der Berstdruck der Behälterstrukturen prognostiziert werden. Dies kann unter anderem den Aufwand an Prüfverfahren zur Zulassung von Druckbehältern reduzieren und deren Nutzung noch sicherer machen.

In Zukunft sollen die KI-Anwendungen weiter erforscht und deren Zuverlässigkeit noch höher werden. ■

## Weltweit einzigartige Expertise

Die Forschung zum Thema Schallemissionsmessung begann am MRM vor mehr als zehn Jahren mit sehr grundlegenden Fragestellungen zur Prüfung von Faserverbundwerkstoffen. Mit der Anwendung auf Druckbehälter wurde mittlerweile eine weltweit einzigartige Expertise erarbeitet, welche sich von automotive-typischen Größen im Meterbereich bis hin zu Behältergrößen von bis

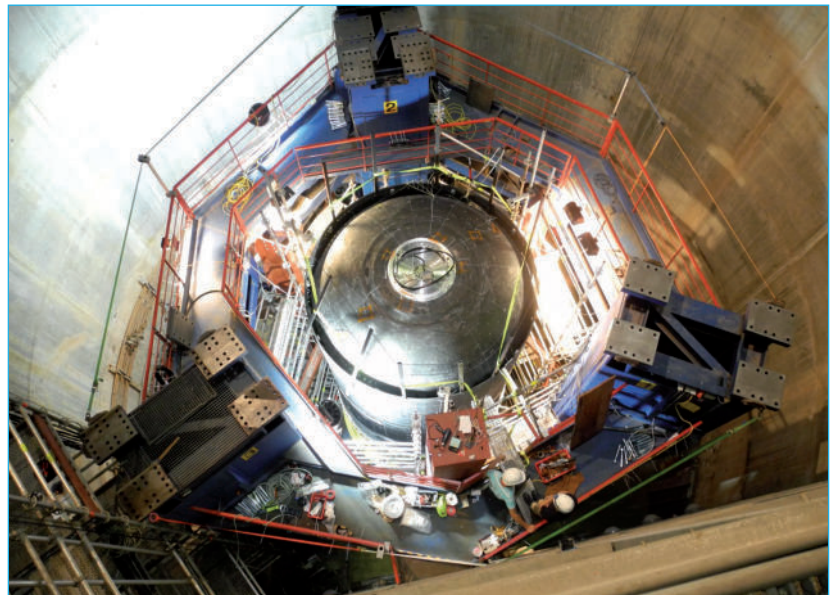


Abb. 1: Installation der Sensorik an einem Druckbehälter mit 3,5 m Durchmesser in einer Testgrube für die Berstdruckprüfung. © MT-Aerospace AG ■

zu 12 Metern Länge im Raumfahrtbereich erstreckt. In diesem Umfeld wurde unter anderem die Entwicklung der Booster für z.B. die Ariane 6-Trägerrakete oder mögliche Minilauncher unterstützt. ■

## Am Anfang ist das Geräusch

Der Forschungsansatz des Teams um Prof. Dr. Markus Sause (Mechanical Engineering) im Kontext der Druckbehälter gestaltet sich wie folgt: Bricht ein Material unter einer mechanischen Belastung, wird die gespeicherte elastische Energie spontan freigesetzt und versetzt die Umgebung in Schwingung. Im Material breiten sich dann elastische Wellen von dem Bruchvorgang aus, dieser wird daher als Schallemission bezeichnet. Vorstellen kann man sich dies wie ein Erdbeben, allerdings auf

viel kleinerer Skala mit kaum wahrnehmbaren Schwingungen im Ultraschallbereich. ■

## Die Schallemissionsanalyse

Diese kleinen Schwingungen werden durch äußerst empfindliche Sensoren auf der Oberfläche eines zu untersuchenden Objekts dank des piezoelektrischen Effekts in ein elektrisches Signal umgewandelt. Aus diesem lassen sich unterschiedliche Informationen gewinnen: Die Betrachtung der Schalllaufzeiten bzw. der Ankunftszeiten des Schallemissionssignals an Sensoren unterschiedlicher Position lassen beispielsweise eine Ortung der Schallemissionsquelle zu. Analog der Vorgehensweise bei der GPS-Navigation lässt sich dabei durch Verwendung mehrerer Sen-



soren eine Ortsbestimmung der Schallquelle auch in einem dreidimensionalen Objekt, wie z.B. einem Druckbehälter, vornehmen. ■

### Herausforderung carbonfaserverstärkte Materialien

Bei der Überwachung eines Druckbehälters aus carbonfaserverstärkten Materialien, z.B. einem H<sub>2</sub>-Druckbehälter, gestaltet sich die Ortung einer Schallquelle aufgrund der anisotropen Materialeigenschaften aufwändiger als in einem Behälter aus isotropen Materialien: Durch die Orientierung der Fasern im Verbundwerkstoff breitet sich der Schall richtungsabhängig mit unterschiedlicher Geschwindigkeit aus. Lokale Abweichungen von z.B. Faserorientierungen oder Faservolumengehalt bringen zusätzlich die Genauigkeit analytischer Berechnungen schnell an ihre Grenzen.

An dieser Stelle kommen daher Methoden der künstlichen Intelligenz zum Einsatz: Mittels maschinellen Lernens können z.B. unterschiedliche Signalankunftszeiten an Sensoren eines Netzwerks dafür genutzt werden, um ein Modell zu trainieren, das die Position einer Schallquelle auch in solchen Situationen sehr präzise bestimmen kann. Fazit des Teams um Professor Sause: Wenn man einen H<sub>2</sub>-Druckbehälter mit einem Prüfdruck beaufschlagt und mit Sensoren ausstattet, kann man sehr genau feststellen, ob – und wenn ja, wo – kleinste Bruchvorgänge stattfinden. ■

### Klassifizierung von Schallereignissen

Durch den Einsatz von künstlicher Intelligenz zur Auswertung der Messdaten kommt zu der Ortung von Bruchereignissen noch ein weiterer, entscheidender Vorteil mit Blick auf die Entwicklung und Fertigung von Druckbehältern hinzu: Die Klassifizierung von Bruchvorgängen. Während bei metallischen Werkstoffen als Versagensmechanismus nur eine Art Risswachstum in Frage kommt, ist die genaue Art des Risses

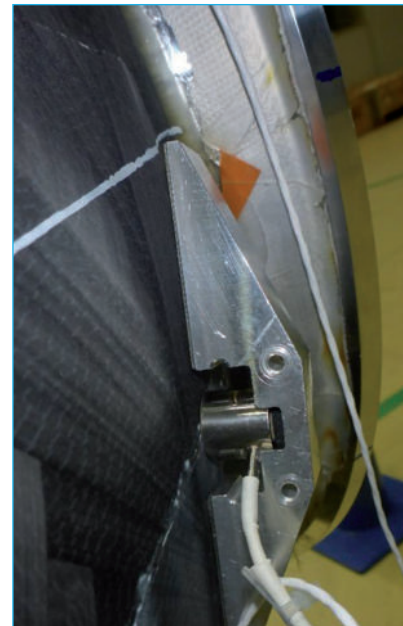


Abb. 2 u. 3: Lastrahmenkonstruktion für Strukturtest an einem großen Druckbehälter für Raumfahrtanwendungen (links), bestückt mit Schallemissionssensoren (rechts). © MT-Aerospace AG ■

für Druckbehälter aus carbonfaserverstärktem Kunststoff oft entscheidend: Handelt es sich um einen Bruch der Fasern, einen Riss in der Matrix oder aber eine Ablösung an der Grenzfläche zwischen Faser und Matrix? Je nachdem kann durch eine Anpassung des Materials oder eines früheren Fertigungsschritts in der Produktion eine höhere Qualität der Druckbehälter erreicht werden. Die Forschenden rund um Professor Sause nutzen dabei einen Effekt aus, der gut bekannt ist: Je nachdem, welches Material bricht, ändert sich das entstehende Geräusch. Man kann diese Unterschiede nutzen, um den charakteristischen Fingerabdruck eines brechenden Materials (z.B. einer Faser oder eines Kunststoffs) mittels KI-basierten Klassifizierungsalgorithmen zu trennen und damit automatisiert zu bestimmen.

Die Begleitung eines Druckbehälters von der Materialauswahl bis hin zum fertigen Produkt mit KI-Methoden ist deshalb wichtiger Bestandteil der Forschung. ■

### Vorhersage des Bauteilversagens

Ergänzend hierzu befassen sich die Forscherinnen und Forscher am MRM mit der Frage, wie man das Versagen einer strukturellen Kom-

ponente – beispielsweise eines Druckbehälters – vorhersagen kann. Aktuell werden in der Abnahmeprüfung Druckbehälter mehrfach mit Innendruck beaufschlagt, beispielsweise mit 1.500 bar bei einer angestrebten Belastung im Betrieb von 1.000 bar. Hält der Behälter stand, weiß man, dass er mit großer Wahrscheinlichkeit die 1.000 bar für lange Zeit aushält. Allerdings kennt man seine tatsächliche Belastungsgrenze nicht und weiß ebenso wenig, ob innerhalb der Produktion über die Zeit hinweg bereits Trends einer Qualitätsabnahme entstehen.

An dieser Stelle setzen die Forschenden an: Es ist durch die genauere Betrachtung der Schallemissionssignale in einem gewissen Zeitraum und den Vergleich mit früheren Ergebnissen u.a. im Labormaßstab gelungen die Last, die zum Versagen eines Druckbehälters führt, quantitativ zu prognostizieren.

Das Verfahren nutzt hierzu wiederum einen Ansatz des maschinellen Lernens, welches diesen Übertrag von Daten aus dem Labormaßstab auf reale H<sub>2</sub>-Druckbehälter ermöglicht. Damit können beim Test die lokalen Belastungszustände berechnet und dargestellt werden (s. *Abbildung 4*), dies erlaubt

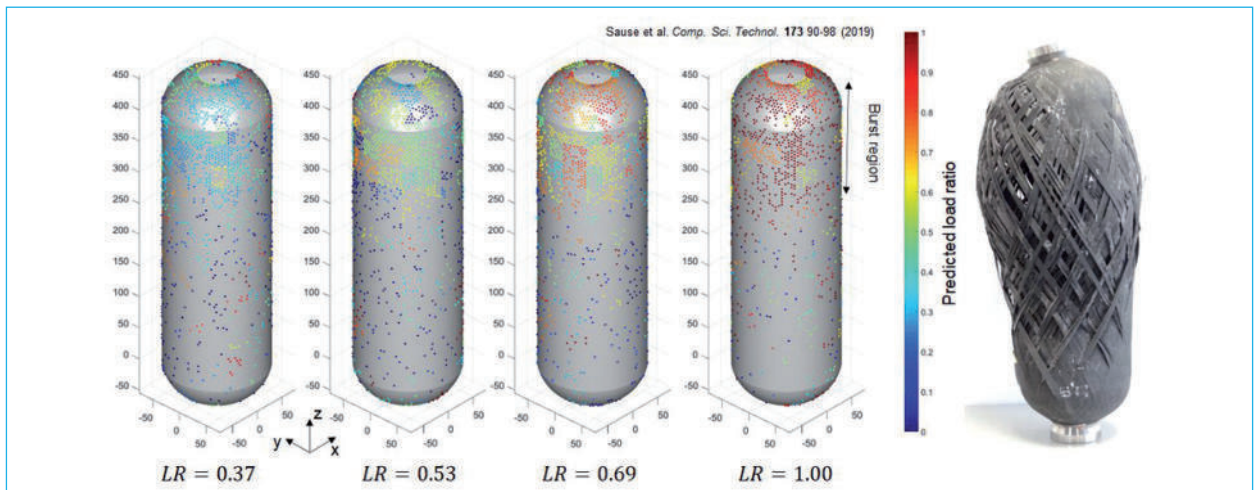


Abb. 4: Beispiel für die lokale Vorhersage der Belastung im Behälter (Load Ratio LR) dargestellt in vier nacheinander folgenden Lastzyklen, sowie der Behälter nach dem Bersttest. © Universität Augsburg ■

Schwachstellen zu visualisieren und die Qualität zu dokumentieren. Dieses Verfahren ist daher ein wichtiger Schritt auf dem Weg hin zu einer besseren und dabei wirtschaftlicheren Zulassungsprüfung von H<sub>2</sub>-Druckbehältern.

Neben dem Einsatz der Schallemissionsanalyse zur Prüfung neuer Behälterdesigns, zur Qualifizierung neuer Materialien oder bei der Zulassungsprüfung von Druckbehältern, kann sie auch zur permanenten Überwachung der Integrität verwendet werden (engl.: structural health monitoring). Dabei helfen ebenfalls Klassifizierungsverfahren basierend auf Methoden der künstlichen Intelligenz, relevante und ggf. kritische Signale bzw. kritische Signalanhäufungen zu identifizieren und darüber hinaus kritische Zustände einer Struktur zu erkennen, bevor sie zu einer Gefahr werden. ■

### Das KI-Produktionsnetzwerk Augsburg

In Zukunft wird das Team um Professor Sause im Rahmen des KI-

*Das KI-Produktionsnetzwerk Augsburg ist ein Verbund der Universität Augsburg mit dem Fraunhofer-Institut für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik IGCV sowie dem Zentrum für Leichtbauproduktionstechnologie des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR). Ziel ist eine gemeinsame Erforschung KI-basierter Produktionstechnologien an der Schnittstelle zwischen Werkstoffen, Fertigungstechnologien und datenbasierter Modellierung.*

Produktionsnetzwerks Augsburg daran forschen, wie man die KI-Verfahren zur Analyse der Schallemission noch effektiver und effizienter einsetzen kann, um sich schneller auf geänderte Fertigungsmethoden, Geometrien oder neue Materialien einzustellen.

Das KI-Produktionsnetzwerk Augsburg bietet dabei eine hervorragende Plattform um die Produktion von H<sub>2</sub>-Druckbehältern vollständig mit Methoden der künstlichen Intelligenz zu begleiten. Dies umfasst die Zustandsüberwachung der Herstellungsprozesse wie Wickeln, Aushärten und die Rückführung der Daten für

eine Prozessoptimierung, über die Prüfung von Druckbehältern bis zur Überwachung und vorausschauenden Wartung der Druckbehälter im Betrieb.

Was die Forschenden antreibt ist der Wunsch, H<sub>2</sub>-Druckbehälter aus carbonfaserverstärktem Kunststoff noch sicherer zu machen und damit einen wichtigen Beitrag für die Mobilitätswende zu leisten. ■

**mrm**  
Materials Resource  
Management

**UNA**  
Universität  
Augsburg  
University

Ansprechpartner:



Prof. Dr.  
Markus Sause  
Universität Augsburg/  
Institut für  
Materials Resource  
Management/  
Mechanical  
Engineering

Tel.: +49-[0]821-598-69161  
E-Mail: markus.sause@mrm.  
uni-augsburg.de  
web: www.mrm.uni-augsburg.de/  
gruppen/sause/

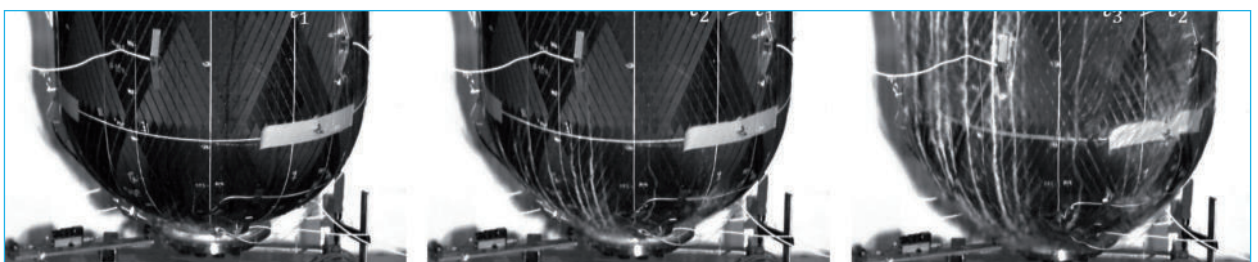


Abb. 5: Identifikation der Position des Berstens eines Druckbehälters unter Druckbeaufschlagung anhand der Aufnahmen einer Hochgeschwindigkeitskamera zu drei Zeitpunkten. © MT-Aerospace AG ■

# Magazinreihe

## Zukunftstechnologien in Bayern

