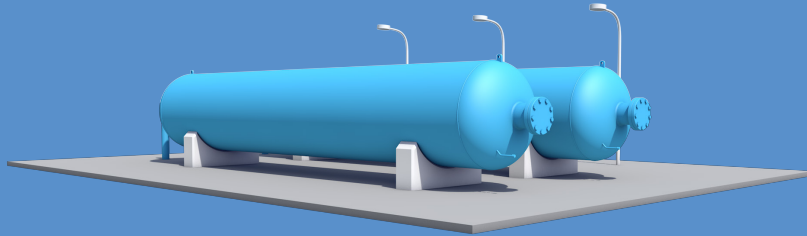


# Factsheet WASSERSTOFF-SPEICHERUNG

## 1. GROSSZYLINDER



Großzylinder sind unter den hier betrachteten Technologien die günstigste und gängigste Art der Wasserstoff-Speicherung im stationären Bereich. Es handelt sich um unverstärkte Stahlzylinder von zwei bis drei Metern Durchmesser und variabler Länge (z.T. > 20 m), die stehend oder liegend errichtet werden können.

Wasserstoff steht üblicherweise mit der Reinheit 3.0 (99,9 %) und 5.0 (99,999 %) zur Verfügung.

### Anwendungsbereich:

Niederdruckspeicher an Tankstellen, Anlagen werden an F&E Institutionen und Produktionsunternehmen verwendet

#### Vorteile:

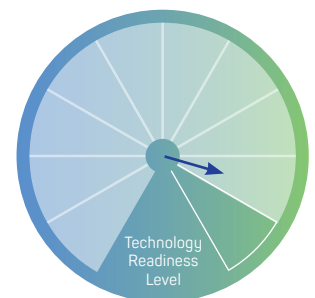
Einfach zu installieren und zu verwenden.  
Geringe Kosten.

#### Nachteile:

Stationär und begrenzte Speicherdichte.  
Die Wasserstoffbefüllung wird zum heutigen Stand per Trailer durchgeführt.

### Kennzahlen:

- ⊕ Speicherdichte: 4 kg/m<sup>3</sup> (50 bar) – 11.5 kg/m<sup>3</sup> (150 bar)<sup>[1]</sup>
- ⊕ Speicherwirkungsgrad: > 95 %
- ⊕ Hydraulisches Volumen: ca. 100 m<sup>3</sup>
- ⊕ Fülldruck: 50 – 150 bar
- ⊕ Füllmenge: 400 – 790 kg
- ⊕ Investitionskosten: ca. 400 € / kg H<sub>2</sub> je nach Druckbehälterttyp (Typ 1 - Typ 4)



Welche  
Perspektiven  
eröffnet die  
Technologie für  
die Region?

**Für stationäre Niederdruck-Anwendungen im Tankstellenbereich sowie in der Forschung und Entwicklung werden Großzylinder eingesetzt.**

[1] „NIST Chemistry WebBook, SRD 69“.

## 2. FLASCHENBÜNDEL

Das Flaschenbündel ist eine der ältesten Technologien zur physikalischen Wasserstoff-Speicherung und besteht aus einer Gruppe von Hochdruckflaschen, die hydraulisch miteinander verbunden und mechanisch in einem Gestell verankert sind. Sie sind in verschiedenen Typen erhältlich, die je nach Materialien (z.B. Stahl, Aluminium und Faserverbundwerkstoffe) und Konstruktionen unterschiedliche Druckanforderungen erfüllen können. Die international anerkannten Typen für Hochdruckflaschen sind Typ 1 bis Typ 4.

Die Flaschenbündel werden üblicherweise mit der Reinheit 3.0 (99,9 %) und 5.0 (99,999 %) angeboten.



### Anwendungsbereich:

Hochdruckspeicher an Tankstellen, Anwendung als Puffer oder für die Bereitstellung kleiner Mengen, z.B. im F&E-Bereich.

#### Vorteile:

Kurzfristige Verfügbarkeit von Wasserstoff in kleinen Mengen z.B. im F&E Bereich.

Gasflaschenbündel sind darüber hinaus standsicher und problemlos zu lagern. Wer mehr Gas benötigt, kann mehrere Gasflaschenbündel zu Wasserstoff Bündelbatterie-Anlagen verbinden und so mehr als 150 m<sup>3</sup> Wasserstoff bevorraten.

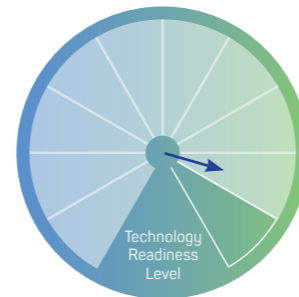
#### Nachteile:

Begrenzte Speicherkapazität, hohe spezifische Kosten und aufwendiger Transport. Während sich Gasflaschen von Hand oder mit Gasflaschenwagen bewegen lassen, ist das mit Flaschenbündeln nicht möglich. Diese lassen sich nur mit einem Stapler oder einem Kran transportieren.

Durch die Einstufung als Gefahrgut unterliegt der Transport den ADR-Vorschriften.

### Kennzahlen:

- ⊕ Speicherdichte: 15 kg/m<sup>3</sup> (200 bar) – 21 kg/m<sup>3</sup> (300 bar)<sup>[1]</sup>
- ⊕ Speicherwirkungsgrad: > 95 %
- ⊕ Volumen: 600 Liter (12 x 50 Liter)
- ⊕ Fülldruck: 200 – 300 bar (700 bar wird aktuell entwickelt)
- ⊕ Füllmenge: 100 – 150 m<sup>3</sup>, 9 – 13 kg
- ⊕ Gewicht (gefüllt): 1.300 – 1.500 kg
- ⊕ Investitionskosten: 8.000 bis 12.000 € (Flaschenbündel) / 850 bis 3.500 € (Neubefüllung)<sup>[2]</sup>



Welche Perspektiven eröffnet die Technologie für die Region?

Wasserstoff-Flaschenbündel sind sehr flexibel einsetzbar und können eine kurzfristige Verfügbarkeit von kleineren Wasserstoffmengen in der Forschung und Entwicklung gewährleisten. Das Picea-System von HPS ermöglicht Energie-Autarkie durch die Kombination von Wasserstoffherzeugung, -Speicherung in Flaschenbündeln und Wasserstoff-Rückverstromung zur Strom- und Wärmeerzeugung für Ein- und Zweifamilienhäuser und kann im Terra Hub (Lugau/Erzgebirge) besichtigt werden.

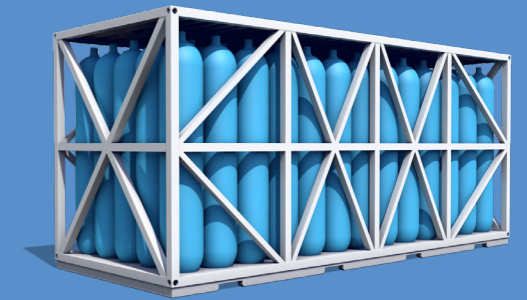
[1] „NIST Chemistry WebBook, SRD 69“.  
[2] „interne Quelle IAV“.

## 3. MULTI ELEMENT GAS CONTAINER (MEGC)

Multiple Element Gas Container (MEGC) sind eine der neueren Technologien für den Transport von Wasserstoff. Diese Behälter sind speziell für Speicherung und Transport von komprimiertem Wasserstoffgas bei hohem Druck entwickelt worden. Der Wasserstoff wird in vielen kleineren Tanks gespeichert, die – meist stehend gelagert – in einem MEGC (typischerweise im 20- oder 40-Fuß-Seecontainer-Format) zusammengefasst sind.

Oftmals werden MEGC auch mit Stützbeinen („Lkw-Wechselbrücke“) ausgerüstet, um das Abladen auch ohne Kran zu ermöglichen und so den eigentlichen Lkw-Anhänger anderweitig nutzen zu können. Dies ist jedoch aktuell nur für 20-Fuß-Container möglich; auch für Schifftransport sind solche Container dann i.d.R. nicht mehr geeignet, da sie nicht stapelbar sind.

Wasserstoff steht üblicherweise mit der Reinheit 3.0 (99,9 %) und 5.0 (99,999 %) zur Verfügung.



### Anwendungsbereich:

Wasserstofftransport, industrielle Gasversorgung, mobile Energieversorgung, Notfallversorgung

#### Vorteile:

Flexibel, skalierbar und mobil. Sie können auf Lkw, Zügen oder Schiffen transportiert werden. Die Container können einfach aufgestellt und an die lokale Wasserstoff-Versorgung angeschlossen werden. Keine zusätzlichen Verdichter – Wasserstoff wird direkt aus der Erzeugungsanlage in den MEGC verdichtet und am Zielort direkt aus dem MEGC der Nutzung zugeführt.

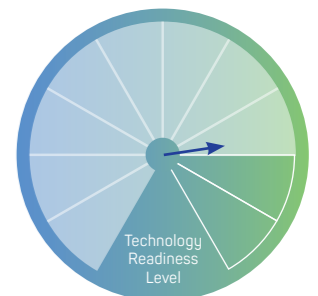
#### Nachteile:

Begrenzte Anzahl von Füllungen (>10.000 Ein- und Ausspeichervorgänge), hohe Kosten durch komplexes Design, spezielle Materialien und besondere Sicherheitsvorkehrungen.

Durch die Einstufung als Gefahrgut unterliegt der Transport den ADR-Vorschriften.

### Kennzahlen:

- ⊕ Speicherdichte: 21 kg/m<sup>3</sup> (300 bar) – 32 kg/m<sup>3</sup> (500 bar)<sup>[1]</sup>
- ⊕ Speicherwirkungsgrad: > 95 %
- ⊕ Hyd. Volumen: 16 m<sup>3</sup> (20 Fuß / 500 bar) bis 40 m<sup>3</sup> (40 Fuß / 300 bar)
- ⊕ Fülldruck: 300 – 500 bar
- ⊕ Füllmenge: 400 kg (20 Fuß / 300 bar) bis 1100 kg (40 Fuß / 500 bar)
- ⊕ Investitionskosten: 250.000 € (20 Fuß, 300 bar) und 900.000 € (40 Fuß, 500 bar)<sup>[3]</sup>



Welche Perspektiven eröffnet die Technologie für die Region?

Für Anwendungen mit Mittel- und Hochdruckspeicherung werden Multiple Element Gas Container (MEGC) verwendet. MEGCs vereinen die Speicherung und den Transport in einer Technologie. Sie können schnell installiert und in Betrieb genommen werden, was besonders wichtig ist, um die Einführung von Wasserstoff als Energieträger zu beschleunigen. Aktuelle Marktvertreter zum Stand Juni 2023 sind Wystrach und Linde.

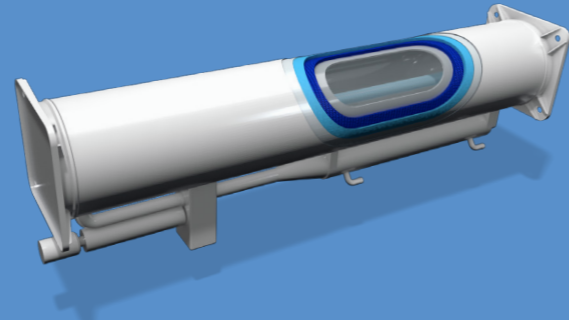
[1] „NIST Chemistry WebBook, SRD 69“.  
[3] „Angebot Wystrach“, 28. September 2020.

## 4. KRYOSPEICHER

Bei der kryogenen Speicherung werden die physikalischen Eigenschaften von tiefkaltem Wasserstoff genutzt, um v.a. die Energiedichte des Speichersystems zu maximieren. Man unterscheidet hier zwischen den Varianten LH<sub>2</sub> („liquid H<sub>2</sub>“), (s)LH<sub>2</sub> („sub-cooled liquid H<sub>2</sub>“) und CcH<sub>2</sub> („Cryo-compressed H<sub>2</sub>“).

Während die ersten beiden Technologien mit flüssigem Wasserstoff (bei Temperaturen < -253 °C) arbeiten, handelt es sich bei CcH<sub>2</sub> um überkritischen Wasserstoff (bei z.T. höheren Temperaturen), d.h. er liegt gasähnlich vor. Ein konkreter, breiter Einsatz dieser Technologien im Fahrzeug ist derzeit jedoch höchstens bei (s)LH<sub>2</sub> (subcooled Liquid H<sub>2</sub>) absehbar; hier arbeiten Daimler Truck und Linde an einem Tank-Standard sowie einer Sattelzug-Maschine.

Wasserstoff steht üblicherweise mit der Reinheit 3.0 (99,9 %) und 5.0 (99,999 %) zur Verfügung.



### Anwendungsbereich:

Raumfahrt, Forschung, größere Tankstellen<sup>[4]</sup>, zukünftig Einsatz in der Logistikbranche angedacht<sup>[5]</sup>

#### Vorteile:

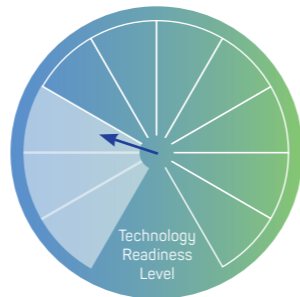
Maximale Energiedichte des Speichersystems.  
Höchste Reinheit des Wasserstoffs.

#### Nachteile:

Hohe Kosten für Kälteanlagen und Tanks, sehr energieaufwendig.  
Teilweise Speichorentleerung durch „Boil-Off“ Effekt (Verdampfung des Wasserstoffs aufgrund von Wärmeübertragung) bzw. „Blow-Off“ Effekt (kontrollierte Druckentlastung des Tanks)

### Kennzahlen:

- ⊕ Speicherdichte: 70 – 80 kg/m<sup>3</sup> für LH<sub>2</sub>, CcH<sub>2</sub> und 90 – 100 kg/m<sup>3</sup> (s)LH<sub>2</sub>
- ⊕ Speicherwirkungsgrad: ca. 70 %
- ⊕ Volumen: 1 m<sup>3</sup> – 100 m<sup>3</sup>
- ⊕ Fülldruck: 10 – 15 bar
- ⊕ Füllmenge: 2 – 4 t H<sub>2</sub>
- ⊕ Investitionskosten: abhängig von spezifischen Anforderungen und Standortbedingungen



Welche Perspektiven eröffnet die Technologie für die Region?

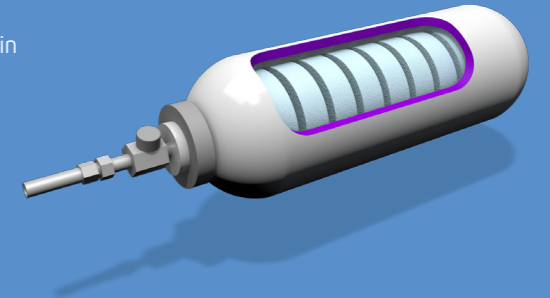
Das Hyliq-Konsortium (TU Dresden, IFW Dresden und HTW Dresden) forscht zu dem Thema Flüssigwasserstoff (LH<sub>2</sub>).

[4] „HyExpert-Abschlussbericht Wasserstoff-Modellregion Fichtelgebirge“. 10. November 2021.  
[5] „cellcentric GmbH & Co. KG“.

## 5. CHEMISCHER SPEICHER (TRÄGERMEDIUM FEST)

Wasserstoff kann in einem festen Trägermedium gespeichert werden. Metallhydride absorbieren gasförmigen Wasserstoff. Beim Kontakt des Wasserstoffgases mit der Feststoffoberfläche der Speichermaterialien zerfallen die Wasserstoffmoleküle in atomaren Wasserstoff und dringen in das Material ein.

Zusätzlich ist die Powerpaste zu nennen – eine Erfindung des Fraunhofer IFAM. Das Trägermaterial ist Magnesiumhydrid-Pulver und es entsteht gasförmiger Wasserstoff beim Kontakt mit Wasser.



### Anwendungsbereich:

Militärische Anwendung (U-Boot), Industrie, Powerpaste für Drohnen mit langen Flugzeiten oder für verschiedene stationäre Anwendungen wie Notstrom-Generatoren

#### Vorteile:

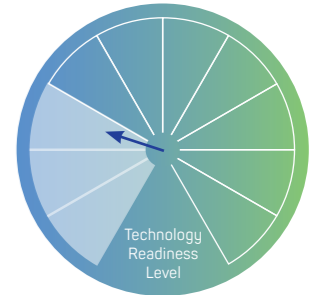
Sehr hohe Speicherkapazität, einfache Handhabung durch niedrigen Druck und hohe Sicherheit (H<sub>2</sub> wird erst bei Wärmezufuhr freigegeben, daher sind Beschädigungen des Tanks unproblematisch).

#### Nachteile:

Hohe Kosten, sehr großes Gewicht – daher nur bedingt für mobile Anwendungen geeignet. ABER Flurförderfahrzeuge haben teilweise Zusatzgewichte verbaut, welche die Traglast des Fahrzeugs erhöhen. Dieses benötigte Zusatzgewicht kann durch schwere Speichermedien erfolgen ohne Einschränkung des Leistungsgewichtes.

### Kennzahlen:

- ⊕ Speicherdichte: 1 – 2 kg H<sub>2</sub> / 100 kg Metallhydrid ggf. bis 5,5 kg H<sub>2</sub> / 100 kg Metallhydrid<sup>[6]</sup>, 1 kg H<sub>2</sub> / 10 kg Powerpaste
- ⊕ Speicherwirkungsgrad: ca. 90 %<sup>[7]</sup>
- ⊕ Fülldruck: 30 bar



Welche Perspektiven eröffnet die Technologie für die Region?

Die AMBARtec AG (Firmensitz Dresden) betreibt eine Pilotanlage zur Wasserstoffspeicherung mit dem festen Trägermedium Eisenoxid. Die Entwicklungen verfolgen eine zeitnahe Serienreife.

[6] „Shell Wasserstoff Studie, Energie de Zukunft“.  
[7] „https://www.erneuerbare-energien-hamburg.de/de/blog/details/wasserstoff-speichern-in-metallhydriden.html“.

## 6. CHEMISCHER SPEICHER (TRÄGERMEDIUM FLÜSSIG)

Ammoniak ist u.a. ein flüssiger Wasserstoffträger, der in der chemischen Industrie häufig verwendet wird. Es ist ein sehr effektiver Wasserstoffträger, der relativ einfach herzustellen und zu handhaben ist.

Methanol wird an Wasserstoff gebunden, um eine flüssige Wasserstoffträgerlösung zu erzeugen. Dieser Prozess wird auch als Methanol-Wasserstoff-Blends bezeichnet

Liquid Organic Hydrogen Carrier (LOHC) speichern den Wasserstoff in einem flüssigen Trägermedium. Dieses Thermal-Öl bindet Wasserstoff chemisch durch eine katalytische Reaktion. Der gespeicherte Wasserstoff kann dann ähnlich wie Dieseltreibstoff gehandhabt werden. Diese Technologie eignet sich besonders für die Speicherung und den Transport von großen Wassermengen.



### Anwendungsbereich:

Erprobung an Tankstellen<sup>[4]</sup>

#### Vorteile:

Sehr hohe Speicherkapazität, einfache Handhabung durch niedrigen Druck und hohe Sicherheit – Handhabung wie Diesel, Benzin

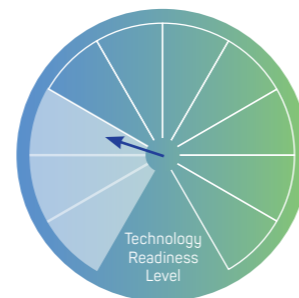
#### Nachteile:

Hohe Kosten, einige LOHC-Materialien basieren auf fossilen Rohstoffen, Ammoniak hat korrosive Eigenschaften

Durch die Einstufung als Gefahrgut unterliegt der Transport den ADR-Vorschriften.

### Kennzahlen:

- ⊕ Speicherdichte: 57 kg H<sub>2</sub> / 1 m<sup>3</sup> LOHC z.B. Dibenzyltoluol<sup>[4]</sup>, 107 kg H<sub>2</sub> / 1 m<sup>3</sup> Ammoniak, 47 kg H<sub>2</sub> / 1 m<sup>3</sup> Methanol
- ⊕ Speicherwirkungsgrad: ca. 70 %
- ⊕ Fülldruck: 1 bar (LOHC), 10 bar (Ammoniak)<sup>[8]</sup>



Welche Perspektiven eröffnet die Technologie für die Region?

Importoptionen für flüssige Energieträger, Einsatz als Energieträger für H<sub>2</sub>-Verbrennungskraftmaschinen (VKM), Einsatz von synthetischen Kraftstoffen für VKM. Der Chemie-Anlagenbau Chemnitz hat ein marktreifes Verfahren zur Herstellung von synthetischem Benzin (CAC Synfuel) auf den Markt gebracht.

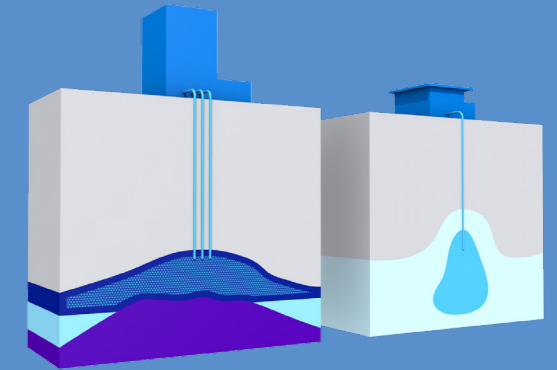
[4] „HyExpert-Abschlussbericht Wasserstoff-Modellregion Fichtelgebirge“. 10. November 2021.  
[8] „Mission Hydrogen Webinar, Hydrogen Distribution“. 28. September 2022.

## 7. UNTERGRUNDSPEICHER

Porenspeicher sind natürliche Lagerstätten, die sich durch ihre geologische Formation zur Speicherung von Gas eignen. Sie befinden sich in porösem Gestein, in dem das Gas ähnlich einem stabilen Schwamm aufgenommen und eingelagert wird.

Bei Kavernenspeichern handelt es sich um künstlich angelegte Hohlräume in unterirdischen Salzstöcken, die über eine hohe Ein- und Ausspeicherleistung verfügen.

Dies ist insbesondere in Verbindung mit großen Pipeline-Netzen (z.B. dem H<sub>2</sub>-Startnetz) von Relevanz, deren Transportkapazität die nötige Ein- und Ausspeicherung im größten Maßstab (allgemein sind mehrere Hundert Tonnen pro Tag denkbar) gewährleisten können.



### Anwendungsbereich:

Langzeitspeicherung von grünem Wasserstoff, Wasserstoffversorgung für Industrie und Mobilität, dezentrale Energieversorgung

#### Vorteile:

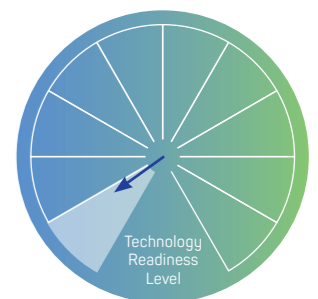
Es können sehr große Mengen gespeichert werden.

#### Nachteile:

Eine Gasreinigungsanlage über Tage ist unerlässlich, um eine hohe Wasserstoff-Reinheit für die weitere Anwendung bereit zu stellen. Das ist vor allem bei Anwendungen für Wasserstoff-Brennstoffzellen zu beachten - die Reinheit für eine Verbrennung von Wasserstoff ist unkritischer z.B. in H<sub>2</sub>-Turbinen zur Wärmeerzeugung.

### Kennzahlen:

- ⊕ Speicherdichte: 6 – 8 kg/m<sup>3</sup>
- ⊕ Speicherwirkungsgrad: ca. 80 %<sup>[9]</sup>
- ⊕ Fülldruck: 30 – 140 bar, je nach Speichertyp und Randbedingungen<sup>[10]</sup>



Welche Perspektiven eröffnet die Technologie für die Region?

Die Forschungsinitiative HYPOS führt ein Pilotprojekt zur Untergrundspeicherung von Wasserstoff in Bad Lauchstädt (Sachsen-Anhalt) durch.

[9] „RAG Sun.Storage Projekt“. Österreich, 31. Oktober 2017. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.underground-sun-storage.at/fileadmin/bilder/SUNSTORAGE/Publikationen/UndergroundSunStorage\\_Publizierbarer\\_Endbericht\\_3.1\\_web.pdf](https://www.underground-sun-storage.at/fileadmin/bilder/SUNSTORAGE/Publikationen/UndergroundSunStorage_Publizierbarer_Endbericht_3.1_web.pdf)  
[10] „Versorgungssicherheit im Energiesystem, die Rolle von Wasserstoff“. Stuttgart, 26. September 2022.

Projekt:

# HYEXPERTS WASSERSTOFF-MODELLREGION CHEMNITZ

## Hintergrund und Motivation der Studie

In der Machbarkeitsstudie wird für die Modellregion Chemnitz ein umsetzungsfähiges Feinkonzept zum Aufbau einer Wasserstoff-Wirtschaft erarbeitet. Es sollen regionale Wertschöpfungsketten für Erzeugung, Transport, Speicherung und Bereitstellung von grünem Wasserstoff etabliert werden. Der Betrachtungsschwerpunkt der Studie im Bereich H<sub>2</sub>-Verbrauch ist der Mobilitätssektor.

## Ziele der Studie

- ⊕ Hochfahren der Wasserstoffwirtschaft in Form von sektorübergreifenden Wasserstoffinseln
- ⊕ Wasserstoff als Teil der Antriebs- und Mobilitätswende
- ⊕ Umsetzungsfähiges Feinkonzept für die Wasserstoffmodellregion Chemnitz zum H<sub>2</sub>-Infrastrukturausbau
- ⊕ Wasserstoffnutzung als Gegenstand von Forschung, Innovation und Wertschöpfung

## Auftragnehmer/Konsortium

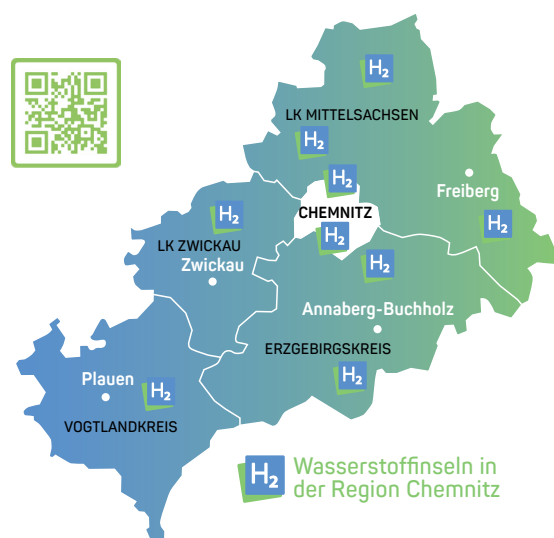
IAV GmbH, Consulting4drive GmbH, Reiner-Lemoine-Institut gGmbH, DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH



## Informationen zur Förderung

„HyLand – Wasserstoffregionen in Deutschland“ ist ein 2019 vom BMVI ausgerufenen Wettbewerb, der sich nun in die zweite Runde begibt. HyLand motiviert Akteure in allen Regionen Deutschlands Konzepte mit Wasserstoffbezug zu initiieren, zu planen und umzusetzen. Ziel des Wettbewerbs ist es, die innovativsten und erfolgversprechendsten regionalen Konzepte zu identifizieren und zu fördern. In der ersten Phase des HyLand-Programms wurden in den drei Kategorien „HyStarter“, „HyExperts“ und „HyPerformer“ bereits 25 Regionen beim Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft gefördert und unterstützt.

In der Kategorie HyExperts wird eine Förderung von jeweils bis zu 400.000 Euro für die Gebietskörperschaften der Gewinnerregionen bereitgestellt. Damit können die Gewinner Beratungs-, Planungs- sowie Dienstleistungen beauftragen. Ziel ist die Erstellung eines umsetzungsfähigen Gesamtkonzepts für eine regionale Wasserstoffwirtschaft.



### Ansprechpartner:

Fachliche Rückfragen:

Martin Hentschel [martin.hentschel@hzwo.eu](mailto:martin.hentschel@hzwo.eu)  
Annelie Kahlenberg [annelie.kahlenberg@iav.de](mailto:annelie.kahlenberg@iav.de)

Wasserstoffregion Chemnitz:

Michelle Vinke [michelle.vinke@hzwo.eu](mailto:michelle.vinke@hzwo.eu)

1. Auflage 09/2023; Herausgeber: HZwo e.V.; Autoren: Annelie Kahlenberg (IAV GmbH), Martin Hentschel (HZwo e.V.)