

Forschungs- und Entwicklungsbedarfe – Bereitstellungspfade für erneuerbaren und kohlenstoffarmen Wasserstoff und seine Derivate

EINLEITUNG

Neben den wirtschaftlichen und regulatorischen Herausforderungen für den Wasserstoffhochlauf gibt es technische Herausforderungen bei der Bereitstellung von erneuerbarem und kohlenstoffarmem Wasserstoff und seinen Derivaten, die es durch Forschung und Entwicklung zu adressieren gilt. Diese Herausforderungen reichen von Themen der Erzeugung über die Verteilung und Speicherung bis hin zur Anwendung von Wasserstoff und seinen Derivaten. Ein Querschnittsthema ist dabei die Wasserstoffsicherheit.

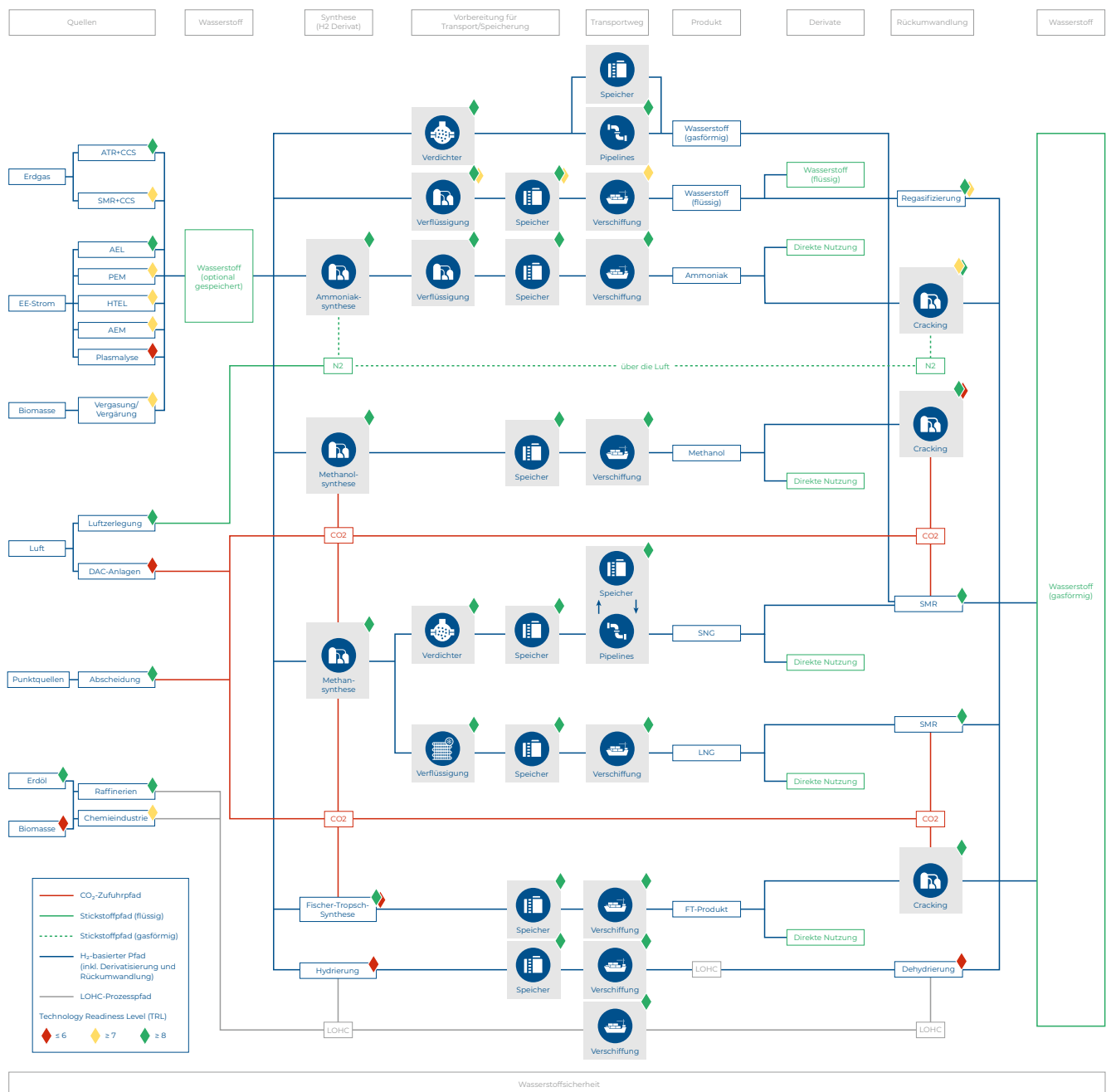
Dieses Informationspapier gibt einen Überblick über die verschiedenen Bereitstellungspfade nach aktueller Literatur¹. Die einzelnen Prozesse werden entlang der Wertschöpfungskette anhand des technologischen Reifegrades („Technology Readiness Level“ (TRL)) klassifiziert (siehe Tabelle 1). Dieser wird in drei farblichen Kategorien in der Grafik dargestellt. Rot deutet auf ein TRL kleiner 6 hin, Gelb auf ein TRL größer 7 und Grün auf ein TRL größer 8.

Tabelle 1: Technologische Reifegrade (TRL) nach Definition des PtJ in Anlehnung an Definition der NASA

TLR 9	Qualifiziertes System mit Nachweis des erfolgreichen Einsatzes
TLR 8	Qualifiziertes System mit Nachweis der Funktionstüchtigkeit im Einsatzbereich
TLR 7	Prototyp im Einsatz
TLR 6	Prototyp in Einsatzumgebung
TLR 5	Versuchsaufbau in Einsatzumgebung
TLR 4	Versuchsaufbau im Labor
TLR 3	Nachweis der Funktionstüchtigkeit einer Technologie „Proof of Concept“
TLR 2	Beschreibung des Technologiekonzepts und/oder der Anwendung einer Technologie
TLR 1	Beobachtung und Beschreibung des Funktionsprinzips

¹ Sterner, M. et al. (2024). 19 Import options for green hydrogen and derivatives – An overview of efficiencies and technology readiness levels. International Journal of Hydrogen Energy, 90, 1112–1127.

Abbildung 1: Bereitstellungspfade für erneuerbaren und kohlenstoffarmen Wasserstoff und seine Derivate, klassifiziert nach technologischer Reife



FORSCHUNGS- UND ENTWICKLUNGSBEDARFE

Viele Bereitstellungspfade können bereits als durchgängig grün klassifiziert werden und sind damit technologisch für den industriellen Einsatz bereit (siehe Abbildung 1). Einzelne Prozesse und Technologien bedürfen aber noch weiterer Forschung und Entwicklung, um weitere Bereitstellungspfade zur industriellen Reife zu bringen. Diese Technologien und Handlungsbedarfe werden im Folgenden in Form von Steckbriefen beschrieben und erläutert².

² Die Reihenfolge impliziert keine Priorisierung der Forschungsbedarfe.

DAC-ANLAGEN ♦

Beschreibung	Direct Air Capture (DAC) bezeichnet Technologien, die CO ₂ direkt aus der Umgebungsluft filtern. Das abgeschiedene CO ₂ kann gespeichert, für die Herstellung von Wasserstoffderivaten (Methanol, synthetische Kraftstoffe) oder als Feedstock für die chemische Industrie eingesetzt werden.
Herausforderungen	Die technische Entwicklung der DAC-Technologie steht noch am Anfang und wird bis zum Jahr 2030 voraussichtlich keinen signifikanten Beitrag für Wasserstoffderivate leisten können. Aktuell existieren lediglich erste Demonstrationsanlagen mit großen technischen Herausforderungen.
Entwicklungsbedarf	Kurzfristig (1–5 Jahre): ♦ Skalierung der reiferen Technologien (z. B. Sorptionsverfahren wie Absorption und Adsorption (Auswahl geeigneter Filtermaterialien und langlebiger, selektiver und kostengünstiger Sorptionsmittel), Wäsche (Hochtemperaturregenerierung), Umwälzung großer Luftmassen, Raumbedarf, Integration in CCU und CCS) ♦ Verbesserung der Kosten- und Energieeffizienz (Wärmemanagement, Luftumwälzung, verringerter Materialeinsatz, Einbindung erneuerbarer Energien) ♦ Langzeitstabilität (Korrosion, Materialforschung, Fouling und Alterung) Langfristig (> 5 Jahre): ♦ Grundlagenforschung zu effizienteren, kostengünstigeren und besser skalierbaren Ansätzen und Konzepten. Zu prüfen ist das Potenzial von neuen Ansätzen wie z. B. Elektrowechseladsorption und Carbonate Looping.

ELEKTROLYSETECHNOLOGIE: PLASMALYSE ♦

Beschreibung	Bei der Plasmalyse handelt es sich um die Wandlung von Erdgas/Biogas/Synthetic Natural Gas (SNG) zu Wasserstoff und elementarem Kohlenstoff mittels thermischen Plasmas (> 1.200 °C) unter Einsatz erneuerbaren Stroms. Weitere Varianten arbeiten mit nicht thermischen Plasmen.
Herausforderungen	Beide Verfahren befinden sich im Versuchszustand in ersten Piloten. Die noch jungen Technologien bedürfen weiterer Erprobung und der Hochskalierung auf Demonstrations- und industrielle Maßstäbe.
Entwicklungsbedarf	Kurzfristig (1–5 Jahre): ♦ Upscaling verschiedener Plasmatechnologien ♦ Verwendungsmöglichkeiten für den Kohlenstoff und dessen Anwendung (Lagerbarkeit, Toxizität, Speicherung, Bildung von Nebenprodukten wie Teer) Langfristig (> 5 Jahre): ♦ Verbesserung der Langzeitstabilität der Prozesse ♦ Nutzung von nicht thermischen Plasmen

LOHC – HYDRIERUNG/DEHYDRIERUNG/BIOMASSE ♦

Beschreibung	Flüssige organische Wasserstoffträger (Liquid Organic Hydrogen Carriers) sind eine seit Langem erforschte Option, Wasserstoff an Wasserstoffträger zu binden und dadurch leichter transportierbar zu machen. Die Freisetzung des Wasserstoffs erfolgt am Ort der Nutzung über einen Dehydrierungsprozess.
Herausforderungen	Es fehlen industrielle Dehydrierungsanlagen. Zudem besteht Entwicklungsbedarf hinsichtlich der technischen Eigenschaften und Kosteneffizienz der Trägermaterialien (Carrier) selbst.

Entwicklungsbedarf	Kurzfristig (1–5 Jahre): ◆ Trägermaterial: Weiterentwicklung zur Erreichung einer geringeren Toxizität, Langzeitstabilität und Kostenreduktion, umfassende Bewertung der ökonomischen und ökologischen Aspekte der organischen Ausgangssubstanzen, die aus fossilen Quellen gewonnen werden und CO₂-Emissionen verursachen, Erhöhung des Wasserstoffanteils im Trägermaterial ◆ Dehydrierung: Skalierung und Verbesserung der Kosten- und Energieeffizienz (Reduzierung der Temperaturniveaus etc.) Langfristig (> 5 Jahre): ◆ Nachhaltige Herstellungsrouten: Aromaten wie Toluol, die bisher aus fossilen Energieträgern in der Petrochemie hergestellt werden, könnten perspektivisch beispielsweise auf ligninhaltiger Biomasse basieren ◆ Steigerung der Produktreinheit auf Wasserstoff 5.0 ohne PSA (Pressure Swing Adsorption)
---------------------------	--

FISCHER-TROPSCH-SYNTHESE AUS NICHT FOSSILEM CO₂ ◆

Beschreibung	Die Fischer-Tropsch-Synthese (FT-Synthese) ist ein chemischer Prozess zur Herstellung von flüssigen Kohlenwasserstoffen wie z. B. Benzin aus Synthesegas (CO + H ₂) und wurde vor 100 Jahren entwickelt. Die klassische FT-Synthese gilt als technisch ausgereift und verwendet als Kohlenstoffquelle bislang vorrangig Kohle und Erdgas, kann aber auch mit nicht fossilen CO ₂ -Quellen betrieben werden.
Herausforderungen	Es gibt erste Pilot- und Testanlagen zur Umstellung auf erneuerbares Synthesegas. Hierbei werden zwei Verfahrenswege verfolgt: 1. mit vorgeschaltetem Wandlungsschritt von CO ₂ zu Synthesegas (z. B. reverse Wassergas-Shift-Reaktion) und 2. direkte Synthese von CO ₂ und H ₂ . Die erste Variante ist bereits weiter fortgeschritten, während die zweite Variante mit CO ₂ als Feedstock noch eine geringe technische Reife hat. Die Einbindung der FT-Synthese in die Raffinerie ist genauer zu betrachten (Nachprozessierung/Weiterverarbeitung von FT-Kohlenwasserstoffen).
Entwicklungsbedarf	Kurzfristig (1–5 Jahre): ◆ Weiterentwicklung von Katalysatoren, z. B. Wasser-Gas-Shift-Fähigkeit zur Verarbeitung von CO₂ ◆ Langzeitbeständigkeit der Katalysatoren auch bezüglich Giften, Verunreinigungen ◆ Weiterentwicklung der Reaktorkonzepte, speziell für kleinere Anlagen Langfristig (> 5 Jahre): ◆ Upscaling und Demonstration der Reaktorkonzepte und Anlagen

AMMONIAK ALS ENERGIETRÄGER ◆

Beschreibung	Ammoniak wird als Energieträger sowohl in der direkten Nutzung (als Kraftstoff) als auch in der Rückkonvertierung (Cracking) zu Wasserstoff als Speichermedium diskutiert. Die Herstellung aus Wasserstoff und Stickstoff ist bekannt. Klassische Verwendungen liegen vorrangig im Düngemittelbereich. Die Herstellung von Ammoniak mit grauem Wasserstoff und Stickstoff aus Luftzerlegungsanlagen ist etabliert. Deren Umstellung auf erneuerbaren Wasserstoff ist problemlos möglich.
Herausforderungen	Es besteht jedoch Entwicklungsbedarf in der sicheren Handhabung als Kraftstoff, dessen motorischer Verwendung und der Abgasreinigung nach der Verbrennung. Beim Einsatz als Wasserstoffträger ist das Ammoniak-Cracking erforderlich. Hier besteht ebenfalls noch Entwicklungsbedarf.
Entwicklungsbedarf	Kurzfristig (1–5 Jahre): ◆ Verbesserung der sicheren Handhabung entlang der gesamten Wertschöpfungskette ◆ Ammoniak-Cracking: Entwicklung effizienterer Katalysatoren und intelligenter Prozessführung, um den Energiebedarf zu senken und die Gesamteffizienz zu steigern; Skalierung der Technologie ◆ Kraftstoff, Motoren, Logistik: Verbesserung der Energieeffizienz und Abgasnachbehandlung in der Optimierung von Motoren ◆ Materialforschung: Weiterentwicklung von z. B. Dichtungen für die großtechnische Anwendung Langfristig (> 5 Jahre): ◆ Materialforschung: Weiterentwicklung von Niedertemperaturkatalysatoren

FLÜSSIGWASSERSTOFF – VERFLÜSSIGUNG, SPEICHER, TRANSPORT PER SCHIFF, REGASIFIZIERUNG ♦

Beschreibung	Wasserstoff wird für den Transport über die Weltmeere verflüssigt, um eine höhere Energiedichte zu erreichen und damit die Transportkosten zu senken. Erste Pilotversuche zwischen Australien und Japan mit grauem Wasserstoff liefen erfolgreich.
Herausforderungen	Der Import von flüssigem Wasserstoff per Schiff erfordert Forschung und Entwicklung zur Optimierung und Vergrößerung (Upscaling) von Verflüssigungsanlagen sowie die Entwicklung von Lagertanks und Handhabungssystemen für große Volumina an Land.
Entwicklungsbedarf	Kurzfristig (1–5 Jahre): ♦ Verflüssigung: Weiterentwicklung und Vergrößerung von Kompressoren, Turbinen, Armaturen und Pumpentechnologie für Verflüssigungsanlagen ♦ Motoren im Schwerlastbereich (Schiffsantriebe etc.): Optimierung des Verbrennungsvorgangs zur Reduktion der Stickoxidemissionen. Entwicklung einer verbesserten Abgasnachbehandlung inklusive optimierter Katalysatoren. ♦ Speicher und Transporttanks: Reduzierung des Boil-offs ♦ Regasifizierung: Optimierung der Abwärmenutzung Langfristig (> 5 Jahre): ♦ Energetische Optimierung von Tanks, Speichern und Verflüssigungsanlagen (z. B. Isolation, Katalysatoren)

DAMPFREFORMIERUNG (SMR) MIT CCS ♦

Beschreibung	Die Dampfreformierung (Steam Methane Reforming) von Erdgas ist die Haupttechnologie zur Gewinnung von grauem Wasserstoff. Die Technologie ist ausgereift, aber mit einem hohen CO ₂ -Fußabdruck verbunden. Über die Abscheidung von CO ₂ und dessen Speicherung (Carbon Capture and Storage, CCS) kann dieser reduziert werden.
Herausforderungen	Bislang wird CCS nicht in größerem Umfang in Kombination mit SMR eingesetzt. Während für die Abtrennung von CO ₂ im Prozess großtechnische Erfahrungen vorliegen, besteht Handlungsbedarf bei der CO ₂ -Abscheidung aus dem Rauchgas (Abgas). Die großskalige Langzeiterfahrung im Dauerbetrieb für die Rauchgasabscheidung (> 90% CO ₂ -Abscheidung) ist noch nicht vorhanden.
Entwicklungsbedarf	Kurzfristig (1–5 Jahre): ♦ Sammlung von Erfahrungen im Dauerbetrieb ♦ Technische und ökonomische Optimierung und Verbesserung der Prozesskombination

ELEKTROLYSETECHNOLOGIE: PEM ♦

Beschreibung	Bei der Protonen-Austausch-Membran-Elektrolyse (Proton-Exchange-Membrane (PEM)) wird Wasserstoff durch Elektrolyse von Wasser in einer Zelle mit einem festen Polymerelektrolyten hergestellt. Sie ist im kleinen MW-Maßstab etabliert und hat im Vergleich zur alkalischen Elektrolyse (AEL) den Vorteil der höheren Leistungsdichte und der Möglichkeit zur dynamischen Fahrweise.
Herausforderungen	Langzeiterfahrung mit großtechnischen Anlagen fehlt.
Entwicklungsbedarf	Kurzfristig (1–5 Jahre): ♦ Reduktion der PGM-Beladung (Platingruppenmetalle) ♦ Sammlung von Betriebserfahrung im flexiblen, lastvariablen Dauerbetrieb von industriellen Anlagen (vor allem Degradation) ♦ Techno-ökonomische Optimierung zur Zellstabilität ♦ Automatisierte Serienfertigung und Skalierung Langfristig (> 5 Jahre): ♦ Grundlagenforschung zu iridiumfreien Stacks ♦ Entwicklung und Optimierung von PFAS-freien Membranen inkl. Langzeittests und Stabilitätsverbesserung zur Reduktion von Umwelt- und Gesundheitsrisiken

ELEKTROLYSETECHNOLOGIE: HTEL ♦

Beschreibung	Bei der Hochtemperatur-Elektrolyse (HTEL) wird Wasserdampf bei hohen Temperaturen in Wasserstoff und Sauerstoff gespalten. Der Prozess zeichnet sich durch hohe Wirkungsgrade aus und ist in Kopplung mit Prozessen, bei denen Abwärme anfällt (Ammoniaksynthese), attraktiv.
Herausforderungen	HTEL befindet sich noch im Entwicklungsstadium. Die größte Herausforderung liegt in der Langzeitstabilität der Stacks im industriellen Umfeld. Dazu kommen Optimierungsfragen in Bezug auf das Wärmemanagement und die Integration der Wärmequelle.
Entwicklungsbedarf	Kurzfristig (1–5 Jahre): ♦ Optimierung des Wärmemanagements ♦ Verbesserung der Robustheit gegen Druckschwankungen ♦ Verbesserung der Langzeitstabilität und Sicherheit Langfristig (> 5 Jahre): ♦ Weiterentwicklung der Zellen (größere Zellflächen, Design for Recycling) ♦ Materialforschung zur Langzeitstabilität/Degradation ♦ Entwicklung kostengünstigerer Materialien

ELEKTROLYSETECHNOLOGIE: AEM ♦

Beschreibung	Die Alkalische-Membran-(AEM-)Elektrolyse ist die jüngste Wasserelektrolysetechnologie und kombiniert die Vorteile der alkalischen und der PEM-Elektrolyse. Sie benötigt keine Edelmetalle, arbeitet im milden alkalischen Medium und kann PFAS-frei hergestellt werden.
Herausforderungen	Die vielversprechende Technologie hat noch eine geringe Marktreife, dementsprechend fehlen Langzeiterfahrungen. Sie hat bislang eine relativ kleine Stackgröße im Vergleich zu anderen Elektrolysetechnologien.
Entwicklungsbedarf	Kurzfristig (1–5 Jahre): ♦ Upscaling und mehrfache Skalierung der Stacks ♦ Dauertests größerer Anlagen im industriellen Umfeld ♦ Technologien für die Automatisierung der Produktion Langfristig (> 5 Jahre): ♦ Verbesserung der Katalysatoren ♦ Entwicklung von Membranen und Beschichtungsverfahren ♦ Techno-ökonomische Optimierung des Verfahrens

WASSERSTOFFSICHERHEIT (QUERSCHNITTSTHEMA)

Beschreibung	Wasserstoff ist das kleinste Element im Periodensystem und weist technische Eigenschaften wie einen weiten Explosionsbereich und eine hohe Diffusionsfähigkeit auf, die besondere Maßnahmen zur sicheren Handhabung erforderlich machen. ³ Wasserstoff wird im industriellen Maßstab in Raffinerien, in der Chemieindustrie, Raumfahrt und anderen Branchen verwendet. Der Umgang in diesen Anwendungen ist sicher und erprobt.
Herausforderungen	Den sicheren Umgang mit Wasserstoff in jenen Bereichen zu gewährleisten, in denen er künftig eine zentrale Rolle spielen wird, stellt eine Herausforderung dar. Gerade die Materialverträglichkeit von Wasserstoff und die Sicherheit in dessen großtechnischer Anwendung erfordern weitere Forschungsarbeiten.
Entwicklungsbedarf	Kurzfristig (1–5 Jahre): ♦ Materialforschung: Prüfung der Eignung aller Komponenten im Versorgungspfad unter realen Druck- und Temperaturbedingungen, Entwicklung einer Systematik zur Bestimmung der Wasserstoffresistenz von verschiedenen Werkstoffen, Erstellung verbindlicher Prüf- und Zertifizierungsregelwerke ♦ Mess- und Sicherheitstechnik: Entwicklung für Wasserstoffanteile größer 20 Volumenprozent ♦ Porenspeicher: geologische und geochemische Fragestellungen zu Löslichkeit oder Reaktionen von Wasserstoff in Porenspeichern unter Speicherbedingungen, geochemischen Wechselwirkungen mit dem Gestein und Gasverlusten im Speicherbetrieb Langfristig (> 5 Jahre): ♦ Weiterentwicklung der Sicherheitsaspekte von Transport-, Speicher- und Anwendungstechnologien

³ NWR-Stellungnahme (2025). [Sicherheitskultur im Wasserstoffhochlauf weiter stärken.](#)



DER NATIONALE WASSERSTOFFRAT

Mit der Verabschiedung der Nationalen Wasserstoffstrategie hat die Bundesregierung am 10. Juni 2020 den Nationalen Wasserstoffrat berufen. Der Rat besteht aus 26 hochrangigen Expertinnen und Experten der Wirtschaft, Wissenschaft und Zivilgesellschaft, die nicht Teil der öffentlichen Verwaltung sind. Die Mitglieder des Wasserstoffrats verfügen über Expertise in den Bereichen Erzeugung, Forschung und Innovation, Dekarbonisierung von Industrie, Verkehr und Gebäude/Wärme, Infrastruktur, internationale Partnerschaften sowie Klima und Nachhaltigkeit. Der Nationale Wasserstoffrat wird geleitet durch Katherina Reiche, Parlamentarische Staatssekretärin a. D.

Aufgabe des Nationalen Wasserstoffrats ist es, den Staatssekretärsausschuss für Wasserstoff durch Vorschläge und Handlungsempfehlungen bei der Umsetzung und Weiterentwicklung der Wasserstoffstrategie zu beraten und zu unterstützen.

◆ **Kontakt:** info@leitstelle-nws.de, www.wasserstoffrat.de