



**EXPERTENEMPFEHLUNG
FORSCHUNGSNETZWERK WASSERSTOFF**





WASSERSTOFF

FORSCHUNGSNETZWERKE
ENERGIE

Impressum

Herausgeber

Projektträger Jülich (PtJ)
Forschungszentrum Jülich GmbH
52425 Jülich

Redaktion und verantwortlich für den Inhalt

Forschungsnetzwerk Wasserstoff

Gestaltung und Produktion

Projektträger Jülich (PtJ)
Forschungszentrum Jülich GmbH
52425 Jülich

Stand

August 2021

Bildnachweise:

Titel: ©SmirkDingo – stock.adobe.com

Die Expertenmeinung ist in einem interaktiven Dialogprozess von den Mitgliedern des Forschungsnetzwerks Wasserstoff im Sommer 2021 erstellt worden.

Die Clustersprechenden möchten sich bei den Teilnehmenden des Konsultationsprozesses ausdrücklich bedanken, ohne deren Engagement es nicht möglich gewesen wäre, die Expertenempfehlung zu erstellen.



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

INHALT

	Zusammenfassung	3	
1.	Erzeugung von Wasserstoff und Folgeprodukten	4	
2.	Infrastruktur und Systemintegration	6	
3.	Nutzung	8	
4.	Sicherheit, Akzeptanz und nachhaltige Markteinführung	10	
	Abkürzungsverzeichnis	12	

Als Bestandteil der Nationalen Wasserstoffstrategie (NWS) wurde das Forschungsnetzwerk Wasserstoff am 30. September 2020 gegründet. Mit seinen mehr als 1.500 Mitgliedern aus Wissenschaft, Wirtschaft und Verbänden deckt es die gesamte deutsche Wasserstoffkompetenz im Bereich der angewandten Energieforschung ab.

Für die Netzwerkarbeit wurden in einem Konsultationsprozess vier Themencluster eingerichtet: Erzeugung von Wasserstoff und Folgeprodukten, Infrastruktur und Systemintegration, Nutzung sowie Sicherheit, Akzeptanz und nachhaltige Markteinführung. Als ein erstes Ergebnis haben die Mitglieder des Forschungsnetzwerks eine Expertenempfehlung vorgelegt, die sie im September 2021 an die Bundesregierung übergeben haben. Das Ziel der Expertenempfehlung ist, den Forschungsbedarf entlang der gesamten Wertschöpfungskette der Wasserstoffwirtschaft bis 2025 zusammenzufassen. Eine umfassende Forschungsagenda, welche die Netzwerkmitglieder aktuell vorbereiten, wird die vorliegende Empfehlung ergänzen und als gebündeltes Fachwissen in den Stakeholder-Prozess des Projekts „H₂-Kompass“ einfließen. Damit werden die Netzwerkmitglieder wesentlich dazu beitragen, die Grundlagen für eine Wasserstoff-Roadmap der Bundesregierung zur Forschungs- und Innovationspolitik zu erarbeiten.

Um die in der NWS anvisierten Ziele zu erreichen, ist eine schnelle Markteinführung und breite Industrialisierung bewährter Technologien mit einhergehender Skalierung in den kommenden Jahren erforderlich. Dies sollte durch die Anhebung des technologischen Reifegrads (TRL) aus dem Prototypenstatus in nachgewiesene wirtschaftliche Systeme geschehen. Hierzu sollten Wissenschaft, Industrie, Prüfeinrichtungen und Verbände eng zusammenarbeiten sowie neue Förderformate weiterentwickelt werden.



Erzeugung von H₂ und Folgeprodukten

Die Optimierung und Industrialisierung der Verfahren zur Wasserelektrolyse sowie der H₂-Gewinnung aus alternativen Quellen sind wichtig für die Erreichung der mittelfristig anvisierten Erzeugungskapazitäten. Parallel sind disruptive Verfahren mit noch niedrigem TRL zu verfolgen, die über ein hohes Potenzial an Effizienzsteigerungen verfügen. H₂-basierte Folgeprodukte können viele in der chemischen Industrie benötigten Grundstoffe klimaneutral ersetzen. Aufgrund ihrer hohen Energiedichte können sie den

H₂-Transport wirtschaftlich verbessern. In Form synthetischer Kraftstoffe, insbesondere im Langstreckenverkehr zu Luft, See und zum Teil auf der Straße, sind sie die einzig plausible nachhaltige Alternative zu fossilen Energieträgern.



Infrastruktur und Systemintegration

Forschung zur H₂-Infrastruktur stellt das zentrale Bindeglied zwischen Erzeugung und Nutzung sicher. Erst im Kontext der Sektorenkopplung kann durch ein effektives Zusammenwirken der Strom-, Gas- und H₂-Infrastruktur das Potenzial von H₂ zur Flexibilisierung und Dekarbonisierung des Gesamtenergiesystems angemessen erschlossen werden. Die H₂-Speicherung sowie die Transport- und Verteilinfrastrukturen sind das Rückgrat einer ganzjährig resilienten Gesamtenergieversorgung. Das dahingehend optimierte Design der H₂-Infrastruktur muss durch weitere systemanalytische Forschung erarbeitet werden.



Nutzung

Die stoffliche und energetische Nutzung von H₂ wird in allen Sektoren (Industrie, Haushalte/Quartiere, Metallerzeugung, Mobilität zu Land, zu Wasser und in der Luft) geprüft und birgt ein enormes Potenzial, Treibhausgasemissionen zu reduzieren. Für die Nutzung des H₂ stehen eine Vielzahl von Technologien zur Verfügung. Es ist essenziell, dass die Forschung weiterhin technologieoffen erfolgt und H₂ in allen Sektoren als Lösungsoption untersucht wird. Nur so werden die Reduktionspotenziale optimal gehoben werden können.



Sicherheit, Akzeptanz und nachhaltige Markteinführung

Für einen nachhaltigen, sicheren Betrieb entlang der Wertschöpfungskette müssen die Forschungsergebnisse zügig in international einheitliche Normen, Standards und Prüfrichtlinien überführt beziehungsweise bestehende Vorgaben auf die neuen Technologien angepasst werden. Um die wirtschaftliche und gesellschaftliche Akzeptanz zu erhöhen, müssen Kriterien für Nachweise zur nachhaltigen Erzeugung, Transport und Sicherheit von H₂ festgelegt werden. Für eine nachhaltige Markteinführung müssen klare Standards zur sozialen, ökologischen und ökonomischen Nachhaltigkeit entwickelt werden. Zudem ist ein verstärkter Austausch zu den methodischen Herausforderungen der Lebenszyklusbewertung von H₂ im Energiesystem erforderlich.

1. ERZEUGUNG VON WASSERSTOFF UND FOLGEPRODUKTEN

Motivation

Die Erzeugung von CO₂-armem Wasserstoff sowie wasserstoffbasierten Folgeprodukten sind wichtige Säulen in der Transformation des Rohstoff- und Energiesystems für eine nachhaltige Gesellschaft. In Summe existieren verschiedene Verfahren zur Herstellung CO₂-armer, stofflicher Energieträger und Grundstoffe, die auf dem Weg zur Klimaneutralität langfristig oder als Brückentechnologien eine entscheidende Rolle spielen.

Beim Wasserstoff fokussiert sich die Nationale Wasserstoffstrategie auf die Erzeugung von grünem Wasserstoff durch Wasserelektrolyse, welche regenerativ erzeugten Strom nutzt. Ferner können alternative photokatalytische, photobiologische und solarthermochemische Prozesse sowie Verfahren unter Einsatz von Biomasse zur regenerativen Wasserstoffherzeugung genutzt werden. Weitere Pfade zur CO₂-armen Herstellung von sogenanntem blauem und türkisem Wasserstoff auf Basis fossiler Energieträger werden derzeit intensiv untersucht.

Im Bereich der Folgeprodukte werden Technologien zur Umwandlung in andere, wasserstoffbasierte Energieträger adressiert, die die Speicher- und Transportfähigkeit erhöhen. Insbesondere in der Luft- und Seeschifffahrt sowie zu Teilen im Schwerlastverkehr sind nachhaltige flüssige Kraft- und Treibstoffe bislang alternativlos, um auf absehbare Zeit Klimaneutralität zu erreichen. Auch in der Stahl- und chemischen Industrie müssen bestehende Produktionsabläufe zur Herstellung von Zwischen- und Endprodukten umgestaltet werden.

Forschungs- und Entwicklungsbedarfe

Gemäß der NWS der Bundesregierung sollen bis zum Jahr 2030 H₂-Erzeugungsanlagen mit einer Gesamtleistung von fünf GW errichtet werden. Dies erfordert eine breite Industrialisierung und schnelle Umsetzung praxistauglicher Technologien. Die großskalige, wirtschaftliche Implementierung dieser Verfahren setzt im Wesentlichen voraus, dass die Kosten durch Effizienzsteigerung und Lebensdauererhöhung sinken sowie industrielle Herstellverfahren etabliert werden.

Daneben besteht dringender Bedarf an der Weiterverfolgung disruptiver Ansätze mit bislang geringem TRL, die jedoch das Potenzial einer deutlichen Erhöhung

der Effizienz bieten. Für alle diese Verfahren ist es grundlegend relevant, neue Materialsysteme (Katalysatoren, Membranen, Elektrodenmaterialien, Werkstoffe) schnell zu entwickeln und zu skalieren.

Die Entwicklung einzelner Technologien muss zudem durch eine systemische Optimierung ergänzt werden. Dies beinhaltet insbesondere folgende Aspekte:

- Ökonomische und ökologische Analyse der gesamten Wertschöpfungsketten
- Ganzheitliche Optimierung der Erzeugungsprozesse für Wasserstoff und Folgeprodukte, wie der Integration von Wärme- und Stoffströmen und der dynamischen Betriebsführung
- Integration der Erzeugungsanlagen in das Energiesystem durch Optimierung der elektrischen Systemtechnik (Kostenreduktion der Technik und Wirtschaftlichkeitsverbesserung des Betriebs)
- Standardisierung und Harmonisierung von Bauteilen sowie Anpassung bestehender Normen und Standards an zukünftige Anforderungen und für einen weltweiten Einsatz

Erzeugung von grünem Wasserstoff durch Elektrolyse

Zur H₂-Erzeugung durch Elektrolyse stehen Verfahren mit unterschiedlichen TRL zur Verfügung. Die **alkalische Wasserelektrolyse** (AEL) zählt zu den etablierten Verfahren mit hohem TRL. Sie benötigt kaum kritische Ressourcen und kann bereits heute in großen Stückzahlen mit hoher Leistung produziert werden. FuE-Bedarf besteht noch an Materialien und Komponenten für hohe Drücke und Temperaturen, angepassten Zell-Designs und bei der Serien- und Massenfertigung. Die **alkalische Membran-Elektrolyse** (AEMEL) hat trotz geringem TRL ein hohes Potenzial, kompakte Elektrolyseinheiten mit hoher Dynamik zu entwickeln. Hier ist es notwendig, dass Komponenten (Membranen, Katalysatoren) weiterentwickelt, die Langzeitstabilität erhöht und Zellstapel und Anlagenkonzeptionen skaliert werden.

Die **PEM-Wasserelektrolyse** (PEMEL) befindet sich derzeit in der großskaligen Markteinführung. Sie weist eine hohe Flexibilität und Leistungsdichte sowie eine geringe Komplexität des Gesamtsystems auf, verwendet aber kostenintensive und teilweise kritische Materialien. Diese gilt es in Zukunft zu reduzieren oder



zu substituieren. Fragen zur industriellen Produktion und zum Recycling müssen gelöst werden.

Die **Hochtemperaturelektrolyse (HTEL)** auf Basis von Festoxidzellen oder protonenleitenden, keramischen Zellen wandelt verdampftes Wasser in Wasserstoff beziehungsweise Gasgemische aus Wasserdampf und Kohlendioxid direkt in Synthesegas um. PEMEL und HTEL zählen zu den effizientesten Verfahren unter den Elektrolisetechnologien und lassen sich auf der Modulebene im System nahezu identisch integrieren. FuE-Bedarf besteht vor allem bei den Materialien (Erhöhung Leistungsdichte, Robustheit und Lebensdauer), dem Scale-Up der Stacks und der Entwicklung vollautomatisierter Herstellungsprozesse.

Erzeugung von grünem Wasserstoff durch alternative Herstellverfahren

Die photoelektrochemischen und photokatalytischen, die solarthermochemischen und die photobiologischen Prozesse wandeln solare Energie direkt in Wasserstoff oder andere chemische Energieträger um. Sie haben das Potenzial, grünen Wasserstoff besonders effizient und kostengünstig herzustellen. Die Verfahren weisen aber einen allgemein geringeren TRL auf. Ziele der Forschung sind, den Wirkungsgrad und die Langzeitstabilität zu erhöhen. Dies gelingt durch effiziente und stabile Materialien (Absorber), kostengünstige Konzepte zur Skalierbarkeit der Zellen und Reaktoren sowie durch die Optimierung photoelektrischer Systemaspekte und der Solarkonzentratoren beziehungsweise die Wärmerückgewinnung bei solarthermochemischen Systemen.

Erzeugung von grünem Wasserstoff aus Biomasse und biogenen Reststoffen

Bei der Produktion von Wasserstoff aus biogenen Quellen und Reststoffen werden Verfahren wie die Fermentation, Reformierung, Vergasung und Plasmalyse genutzt. Sie können in regional geschlossenen Stoffkreisläufen kosteneffiziente Wasserstoffquellen erschließen. Durch angeschlossene Technologien zur CO₂-Abtrennung und -Speicherung sowie -Nutzung (CCS/CCU) ergeben sich effektive Treibhausgas-(THG)-Senken. Forschungsbedarf besteht bei der Skalierung solcher Anlagen auf industriellen Maßstab sowie bei der effizienten Eduktaufbereitung und Abtrennung des Wasserstoffs.

Erzeugung von blauem und türkischem Wasserstoff

Blauer Wasserstoff wird aus fossilen Rohstoffen gewonnen, indem das CO₂ abgeschieden und gespeichert wird. Türkiser Wasserstoff wird über die Methanpyrolyse aus fossilem Erdgas oder aus biogenen Quellen (wie Biogas) hergestellt. Der Kohlenstoff liegt anschließend als elementarer Feststoff vor. Die für die Pyrolyse notwendige Energie kommt aus regenerativen Quellen. Beide Ansätze erfordern einen verhältnismäßig geringen Energieaufwand, bieten die Möglichkeit zu einem schnellen Hochlauf einer H₂-basierten Energieversorgung und können innerhalb kurzer Zeit zu einer THG-Minderung beitragen. FuE-Bedarf besteht darin, Pyrolyse-Prozesse in den Demonstrationsmaßstab zu überführen und CCU-Verfahren sowie Verfahren der dauerhaften und sicheren Lagerung von CO₂ zu entwickeln.

Erzeugung von wasserstoffbasierten Folgeprodukten

Die Produktion nachhaltiger synthetischer Grund- und Kraftstoffe auf Basis von klimaneutral erzeugtem Wasserstoff, Kohlenstoff oder Synthesegas (H₂/CO) ist ein wichtiger Baustein, um die Klimaziele zu erreichen. Produkte wie Methan, Methanol, Ammoniak, Olefine und Ether sind zentrale Elemente in der zukünftigen Chemie- und Kraftstoffindustrie. Zudem können sie, wie auch Liquid Organic Hydrogen Carriers (LOHC), als Trägermedium für Wasserstoff dazu beitragen, den Transport von Wasserstoff effizienter und sicherer zu gestalten. In der Luft- und Seeschifffahrt sowie zu Teilen im Schwerlastverkehr sind flüssige chemische Energieträger aufgrund ihrer hohen Energiedichte auf absehbare Zeit alternativlos.

FuE-Bedarf für die Erzeugung wasserstoffbasierter Folgeprodukte besteht daher in der schnellen industriellen Umsetzung marktfähiger Gesamtprozessketten. Hierfür müssen unterschiedliche Teilprozesse ideal aufeinander abgestimmt werden, um eine wirtschaftliche großtechnische Produktion zu ermöglichen. Neben der Optimierung etablierter Technologien bieten neuartige disruptive Verfahren trotz niedrigem TRL das Potenzial für deutlich höhere Gesamteffizienzen, wie die direkte elektrochemische Synthese von Methan, Methanol, Ammoniak und Dimethylether (DME) sowie solarthermische, photochemische und biochemische Synthesen.

2. INFRASTRUKTUR UND SYSTEMINTEGRATION

Motivation

Als Bindeglied zwischen den Erzeugungs- und Nutzungsorten sowie als Speicher kommt der Wasserstoffinfrastruktur in einem zukünftigen Energiesystem eine zentrale Bedeutung zu. Die H₂-Speicher sowie die Transport- und Verteil-Infrastrukturen müssen als Rückgrat einer Wasserstoffstrategie frühzeitig neugestaltet werden, um jene Engpässe und Verzögerungen von vornherein zu vermeiden, die derzeit den Umbau des Stromsektors bremsen.

Zudem kann erst durch ein effektives Zusammenwirken der Strom- und Gas- beziehungsweise H₂-Infrastruktur das Potenzial des Wasserstoffs zur Flexibilisierung und Dekarbonisierung des Gesamtsystems vollumfänglich genutzt werden. Eine optimale sektorenkoppelnde Gesamtsystemintegration der Wasserstoff-Infrastruktur ist daher von zentraler Bedeutung.

Da sowohl die Infrastruktur als auch die strategische Gesamtsystemintegration zu frühzeitigen Weichenstellungen im Transformationsprozess führen, haben beide Felder eine hohe Priorität auf der Forschungsseite.

Forschungs- und Entwicklungsbedarfe

Die FuE-Bedarfe im Bereich der H₂-Infrastrukturen werden in fünf Themenbereiche unterteilt. Übergeordnet gilt für alle Bereiche:

- **Technologieoffenheit und ein systemischer Ansatz** gewährleisten eine optimale Nutzung der Technologieoptionen und deren Synergien sowie eine schnelle Markteinführung und einen effektiven Hochlauf über die gesamte Einsatzbreite der H₂-Infrastrukturen.
- **Fokus der FuE-Maßnahmen** liegt auf Erhöhung der Wirtschaftlichkeit, Versorgungssicherheit, Nachhaltigkeit und Resilienz durch Optimierung, Weiterentwicklung und Innovation sowie einem verbesserten Verständnis der zukünftigen Systemausgestaltung und Betriebsführung.
- **Zeitnahe Umsetzung** der notwendigen FuE-Maßnahmen ist erforderlich, da H₂-Infrastrukturen eine wesentliche Basis einer Wasserstoffwirtschaft darstellen und frühe Fehler bei technischen Weichenstellungen volkswirtschaftliche teure Lock-In-Situationen hervorrufen können.

- **Markteintritt erster Technologieoptionen** ist in allen Bereichen bereits gegeben und sollte parallel zu notwendigen FuE-Maßnahmen verfolgt werden.
- **Kompatibilität sowie Interoperabilität** sind zu entwickeln und optimieren, um Synergieeffekte vollumfänglich ausschöpfen zu können.
- Klare Definitionen von **Standards und Normungen** über alle Themenbereiche bilden die Basis von marktfähigen Technologielösungen.

Nachstehend sind für die fünf Themenbereiche die jeweils wichtigsten FuE-Bedarfe bis 2025 zusammengefasst.

Transport-Infrastruktur für straßen-, schiffs- und schienen- gebundenen H₂-Transport

- Technische Entwicklung der energetisch und ökologisch sowie wirtschaftlich effizientesten H₂-Transporttechnologien (wie Flüssigwasserstoff (LH₂), Druckwasserstoff (CH₂), synthetische Kraftstoffe, LOHC, Metalle und ihre Hydride, NH₃ als H₂-Träger)
- Weiterentwicklung sowie Optimierung der mobilen H₂-Speicherung, Betankungstechnologien/-prozesse und Umfüllungstechnologien/-prozesse (wie bedarfsgerechte H₂-Qualität, H₂-Druck, kontrollierte H₂-Entspannung, Boil-Off-Effekte beim Transport von LH₂)
- Neue Ansätze für Sicherheitsbeurteilungen von Druckgefäßen auf Straße, Schiene und Wasserstraße
- Methodenentwicklung zur zerstörungsfreien Prüfung von H₂-Speichern (Materialprüfung) sowie die H₂-Qualitätssicherung

Pipelinetransport Verteilnetz

- Materialforschung zur Identifikation und Entwicklung von H₂-kompatiblen Werkstoffen für Leitungen, Armaturen und Anlagen mit Berücksichtigung der Hauptbelastung (Druck- und Temperaturzyklen) und der Permeation von Wasserstoff
- Entwicklung von Materialien für die Gasseparation und von geeigneten Beschichtungsverfahren zur



Ertüchtigung von bestehenden Gasleitungen für Wasserstoff

- Entwicklung von sicheren Umstellungsprozessen und Strategien für die Transformation von konventionellen Gasnetzen zu Wasserstoffnetzen. Dabei kann neben reinen Wasserstoffleitungen auch die H₂-Beimischung zum Erdgas berücksichtigt werden.
- Gasbeschaffenheitsmessungen für die Überwachung des Gas-Mischverhältnisses in den Leitungen und Gasetektion bei möglichen Leckagen

Pipelinetransport Gas- und Fernleitungsnetze

- Materialforschung zur Identifikation und Entwicklung von H₂-kompatiblen Werkstoffen für Leitungen, Armaturen und Anlagen mit Berücksichtigung der zyklischen Parameter Druck und Temperatur und der Permeation von Wasserstoff
- Weiterentwicklung zur Anhebung der TRL von relevanten Anwendungen, beispielsweise Verdichter (mechanische und elektrochemische Verdichter), Gasaufbereitung und Sensorik sowie Messtechnik, um die notwendige Skalierung und Kostenreduktion zu erreichen
- Im Bereich der Verdichter und deren Antriebe bestehen Entwicklungsbedarfe für die neuen Anforderungen des H₂-Transports mit hohen Volumenströmen.

Mittel- und großskalige H₂-Speicherung

- Entwicklung von geologischen Speichern und entsprechenden Strategien ihrer Transformation zu H₂-Speichern. Dabei sind verschiedene Themenaspekte wie Mikrobiologie, Eignungsprüfung, Zementation/Komplementierung und Gasreinigung zu berücksichtigen.
- Entwicklung und Erprobung von Betriebsstrategien für H₂-Speicher, um die veränderten Randbedingungen in Bezug auf dynamische Fahrweise und thermodynamische Eigenschaften zu berücksichtigen

- Weiterentwicklung zur Anhebung der TRL von oberirdischen Hochdruck-, Feststoff- und Flüssigspeichern sowie chemischen Speichern und deren Zusammenspiel (multimodale Speicher) zur Erreichung der notwendigen Skalierung und Kostenreduktion

Gesamtsystemmodellierung/-integration

- Entwicklung von Simulationswerkzeugen für eine integrierte Systemplanung mit technologieoffener Infrastrukturmodellierung im Viereck von Versorgungssicherheit, Wirtschaftlichkeit, Nachhaltigkeit und Resilienz
- Technologien und Konzepte zur dezentralen Kopplung aller Energiesektoren mit der H₂-Infrastruktur unter Einbezug verteilter Rückverstromungsansätze (wie H₂-Kraft-Wärme-Kopplung (KWK))
- Open-Science-Modellierung der Transport- und Verteilnetze in Verbindung mit optimierenden Modellierungen zur ganzheitlichen Sektorenkopplung (Strom, H₂, grüne Kohlenwasserstoffe, Wärme) und der Energienachfrage (Mobilität, Logistik, Industrie, Gewerbe, Gebäude)
- Entwicklung von Transformationsstrategien (global bis lokal, zentral vs. dezentral) sowie Roadmaps, welche unterschiedliche Szenarien und Marktentwicklungen berücksichtigen (wie Sektorenkopplung mit H₂, Transformationskosten, Betreibermodelle für H₂-Infrastruktur)

Als Fazit und Zusammenfassung sind die Wasserstoffverteilung, -speicherung und -systemintegration der Lebensnerv resilienter klimaneutraler Energiesysteme. Daher kann und sollte der Markteintritt durch die Skalierung marktfähiger und bekannter Technologien zeitnah erfolgen, während gleichzeitig systemanalytische Forschungen helfen, das Systemdesign zu optimieren, um bestmögliche Weichenstellungen im Transformationsprozess sicherzustellen. Die aufgeführten FuE-Bedarfe sind bis 2025 essenziell, um die ökonomische Attraktivität der Speicher-, Transport- und Systemtechnologien durch Weiterentwicklung und Innovation zu steigern.

3. NUTZUNG

Prinzipiell kann Wasserstoff überall dort eingesetzt werden, wo heute fossile Brennstoffe genutzt werden. Die technische Reife der Anwendungen variiert jedoch deutlich: Während einige bereits industrialisiert sind,

werden andere erst in einigen Jahren Serienreife erreichen. Nachfolgende Tabelle fasst den Entwicklungsstand der Technologien anhand der TRL zusammen, die mit reinem Wasserstoff betrieben werden sollen.

	Industrie: Stofflicher Einsatz	Industrie: Energetische Nutzung für Prozesswärme und -dampf	Stationär: Einsatz in Gewerbe und Industrie	Stationär: Einsatz in Haushalten	Mobil: Einsatz im PKW	Mobil: Einsatz im LKW	Mobil: Einsatz im Schienenverkehr	Mobil: Einsatz in der Schifffahrt	Mobil: Einsatz im Flugverkehr
H ₂ -basierte Direktreduktion und Schmelzprozesse	TRL 7								
H ₂ -Industrieöfen	TRL 6	TRL 2-7							
H ₂ -Feuerungsanlagen/ Prozesswärme/ Brennwertechnik/ Dampferzeugung	TRL 6	TRL 2-5	TRL 4	TRL 6					
Stationäre H ₂ -Brennstoffzelle (BZ)			TRL 4-8	TRL 4-8				TRL 3-6	
H ₂ -Gasturbine	TRL 6		TRL 4					TRL 4-6	TRL >4
H ₂ -Blockheizkraftwerk			TRL 5-6	TRL 8				TRL 3-6	
Mobile H ₂ -BZ					TRL 3-9	TRL 4-7	TRL 4	TRL 3-6	TRL 1-6
H ₂ -Speichersysteme				TRL 7	TRL 4-9	TRL 4-9	TRL 2-5	TRL 4	TRL 3-7
Mobiler H ₂ -Verbrennungsmotor					TRL 6	TRL 4-6	TRL 4	TRL 5-6	TRL >4

Kurz- und mittelfristiger Forschungsbedarf

- Technologieentwicklung für sichere und effiziente H₂-Verbrennung: Brennerentwicklung, Motorentwicklung, Flammenüberwachung, Emissionen
- Materialverträglichkeitsuntersuchung in H₂-Atmosphäre sowie Gasen aus H₂-Verbrennung
- Messverfahren, Steuer- und Regelstrategien für wechselnde Brennstoffbeschaffenheit
- Lebensdauererhöhung, Stresstestszenarien für beschleunigte/standardisierte Erprobung
- Optimierung der Systemeffizienz und -integration von H₂-Anwendungen
- Entwicklung von BZ- und KWK-Systemen

- Rahmenbedingungen und Standortfaktoren zum H₂-Einsatz, Aufbau der Infrastruktur und Versorgungssicherheit
- Sozioökonomische Bewertung der Verfahrensumstellung auf die H₂-Anwendung
- Nachhaltigkeit in der gesamten Lieferkette
- Bewertung zum direkten und indirekten Einsatz von gasförmigen sowie flüssigen H₂-Trägern

Industrie: Stofflicher Einsatz, insb. in der Metallherzeugung

- Stoffliche Nutzung zur Reduktion (Einsatz von NH₃ und Synthesegas) und für CCU
- Rohstoffeinfluss auf Produkteigenschaften und Prozessbedingungen in H₂-basierter Produktion



- Systemintegration (Prozesssimulation, Regelleistung, Recycling von H₂)

Industrie: Energetische Nutzung für Prozesswärme und -dampf

- Materialuntersuchungen/-Entwicklungen für Anlagenkomponenten und Feuerfestmaterialien
- H₂-Einsatz statt Erdgas/Kuppelgasen in HT-Prozessen
- Auswirkungen auf Produktqualität, - Kapazität, Schadstoffemissionen, Wärmeübertragung, Effizienz, Ausbringen der Anlage

Stationär: Einsatz in Gewerbe und Industrie

- Optimierte, kostengünstige Betriebsführung, Überwachung von Verbrennungsprozessen beim Einsatz von reinem H₂
- Elektrochemische Nutzung (BZ): Skalierung in großvolumige Industrialisierung inkl. Aufbau einer Zuliefererlandschaft; Zustandsüberwachung, interoperable Systemtechnik, lebensdauer-schonend/netzdienlicher BZ-Betrieb

Stationär: Einsatz in Haushalten

- Wirtschaftlich/sozial-ökologische H₂-Anwendungsfälle in Verbindung mit Heizungs-, Lüftungs- und Klimatechnik
- Feldtests unter Realbedingungen

Mobil: Einsatz im PKW

- Simulationsmodelle für H₂-Verbrennungsprozesse
- Industrialisierung von BZ-Stack, H₂-Tanksystemen und Komponenten
- Materialforschung → Substituierung von problematischen Verbindungen knapper Ressourcen (MEA)
- Betriebsstrategie/Hybridauslegung/Systemaufbau/TCO-Kosten

Mobil: Einsatz im LKW

- Gesamtantriebsstrang-/Fahrzeugoptimierung (Betriebs-/Hybridstrategie, Kühlsystem)

- Speicher- und Betankungstechnologien (Kompression, Kühlung, Massendurchsatz)

- Verbrennungskraftmaschine (VKM) Konzepte für (Sub)-Zero Emissionen

- Wirkungsgradoptimierung (VKM: Tribologie, Abwärme, Direkteinblasung, Brennverfahren inklusive Simulation; BZ: Komponenten)

Mobil: Einsatz im Schienenverkehr

- Untersuchen von bahnspezifischen Anforderungen, bezüglich der wirtschaftlichen Nutzung von H₂
- Methoden und Technologien zur Um- und Ausrüstung von Bestands- und Neufahrzeuge
- Simulationsmethodik Fahrzeug-Antrieb und -Kühlung inkl. Hybrid-Energiemanagement

Mobil: Einsatz in der Schifffahrt

- Systemvergleich H₂-(träger)
- Demonstratoren im Schiffseinsatz (Bunkern, Tank-/Konvertersysteme, Kraftstoffaufbereitung, Systemintegration, Hybridisierung dynamischer Anwendungen); Transportschiffe
- Verbrennung in Kolbenmaschinen, H₂-Generierung an Bord, Direktnutzung in BZ
- Hybride Nutzung mit anderen Kraftstoffen

Mobil: Einsatz im Flugverkehr

- Erhöhung Leistungs-/Energiedichte des BZ-inklusive Treibstoff-Systems
- FuE von luftfahrtspezifischen Komponenten
- Entwicklung und Management des Thermalsystems inklusive LH₂-Tank
- Gewährleistung Zuverlässigkeit, Lebensdauer und Nachweisbarkeit der Flugsicherheit
- Treibstoff-Bereitstellung (H₂, eFuels), Betankungstechnologie, Infrastruktur

4. SICHERHEIT, AKZEPTANZ UND NACHHALTIGE MARKTEINFÜHRUNG

Motivation

Die Wasserstoffwertschöpfungskette beinhaltet Themen, die weder der Erzeugung noch der Infrastruktur oder Nutzung zugeordnet werden können, jedoch Anknüpfungspunkte zu allen Technologien in den Bereichen besitzen. Daher ist es wichtig, die technischen Fragestellungen im Kontext der Themenbereiche zu betrachten und die Forschungs- und Entwicklungsbedarfe miteinander zu kombinieren.

Forschungs- und Entwicklungsbedarfe

Als übergeordnete Querschnittsthemen sind die Sicherheit, Normung und Standardisierung (RCS) sowie Akzeptanz, Nachhaltigkeit und die Fragestellungen der Markteinführung zu verstehen. Zur Adressierung der Querschnittsthemen bieten sich Projektkonzepte an, die die gesamte Wertschöpfungskette betrachten.

Sicherheitstechnische Fragestellungen beantworten und Konzepte bedarfsorientiert weiterentwickeln

- Leckageüberwachung: Innovative Methoden zum Bereichsmonitoring, Konzepte zur Sensorauswahl, Sensorkombination und Sensorverteilung, auch unter Einsatz von KI
- Schutzkonzepte: Leitfäden für spezifische Schutzmaßnahmen und Festlegung von Schutzbereichen (wie Zonen, Sicherheitsabstände, Gefahrenbereiche), insbesondere für LH₂; QRA Werkzeuge
- Verhalten von H₂ in Unfallszenarien: Verbesserung des Verständnisses entsprechender Szenarien zur Unterstützung der Entwicklung von RCS; Entwicklung von Modellen für Risikominderungspotenziale verschiedener Schutzmaßnahmen
- Materialeignung und -kompatibilitäten: Leitfäden für die sichere Auswahl geeigneter Materialien; Entwicklung von Prüfverfahren für die H₂-Tauglichkeit und Schadensfrüherkennung; Entwicklung neuer Werkstoffkonzepte; Erweiterung bestehender beziehungsweise Entwicklung neuer Prüfkonzepte und Prüfinfrastruktur zur Charakterisierung des Deformations- und Schädigungsverhaltens bei hohen Temperaturen (H₂-Verbrennung, H₂-Verdichtung, HT-Brennstoffzelle, HT-Elektrolyse), Werkstoffbasierte Modelle zur Vorhersage der Lebensdauer von Bauteilen im Kontakt mit H₂

- Additive Manufacturing: Einsatz additiver Fertigungstechnologien für Komponenten als Produktionsansatz (wie Armaturen, Brennstoffzellen)

Erforderliche Normung für weltweite Qualitätsstandards

- Erstellung einer Normungsroadmap zur Beschreibung eines Handlungsrahmens, der die deutsche Wirtschaft und Wissenschaft im internationalen Wettbewerb stärkt und innovationsfreundliche Rahmenbedingungen für die Technologie der Zukunft schafft (Bestands- und Bedarfsanalyse)
- Zertifizierung und Freigabe von Produkten: Erarbeiten von technischen und regulatorischen Rahmenbedingungen für die Zertifizierung, Abnahme und Freigabe von Produkten; Berücksichtigung von Methoden zur Risikobewertung; Kombination von Prüfung und Simulation

Akzeptanz bei verschiedenen Akteuren fördern

- Wissenstransfer: Konzepte zur Aus- und Fortbildung von Fachkräften; Information der Zivilgesellschaft für ein allgemeines Sicherheitsverständnis; Erarbeiten von Bildungsstrategien; Gestaltung der Akzeptanzkriterien
- Entwicklung von Kommunikationsstrategien für negative, medial relevante Einzelfälle im Zusammenhang mit Wasserstoff
- Akzeptanzforschung mit Zielgruppen unter Berücksichtigung von ökologischen und geo-politischen Fragen (wie Import: Akzeptanz und Teilhabe der lokalen Bevölkerung in Partnerländern) sowie Akzeptanzveränderung durch den Markthochlauf
- Erstellung eines Risikomodells für die Einführung und Analyse von Akzeptanzkriterien für Risiken
- Transferforschung aus der Energie- und Verkehrswende sowie Innovationsforschung

Rahmenbedingungen für Geschäftsmodelle der Zukunft

- Erarbeitung von Szenarienwelten, um H₂-Bedarfe mit regelmäßigen Aktualisierungen zu erörtern
- Erarbeitung eines Marktdesigns zum technologieoffenen Hochlauf von H₂



- Analyse zu Anreizsystemen unter Berücksichtigung von Aspekten der Sicherheit, Akzeptanz und Nachhaltigkeit
- Transferforschung aus der Energie- und Verkehrswende sowie Innovationsforschung und Transfer auf die Wertschöpfungskette von H₂
- Identifikation möglicher Marktnischen mit besonderer Dynamik für den Markthochlauf
- Untersuchung des Einflusses früherer energie-wirtschaftlicher Maßnahmen und Beurteilung der Übertragungsmöglichkeit (wie EEG)
- Analyse der Verträglichkeit von verschiedenen Regulierungsbedingungen mit internationalem Recht
- Analyse des Mehrwerts der Produktion von H₂ im Hinblick auf Netz- und Systemdienlichkeit unter Berücksichtigung der Anwendung in verschiedenen Sektoren
- Untersuchung der zu erwartenden Kostenentwicklung für die Produktion von H₂ und dessen Transportmöglichkeiten
- Analyse der Zahlungsbereitschaft für „grüne“ Produkte
- Vergleichende Policy-Analysen in den EU-Staaten und Erörterung der Vereinheitlichung auf EU-Ebene zu bestimmten Themen (wie Zertifizierung grünen Wasserstoffs)
- Einordnung verschiedener Importstrategien vor dem Hintergrund geopolitischer Entwicklungen und potenziell normativer Zielsetzungen: Monitoring der internationalen Energiewirtschaft im Wandel von Gewinnung von Rohstoffen zu Konversion, Analyse der Rolle von Technologien und Technologieführerschaft
- Analyse der Rolle der EU in einer sich entwickelnden H₂-Wirtschaft mit größeren Wahlmöglichkeiten in Bezug auf mögliche Partner (wie möglicher Einfluss auf Standards und Werte)

Nachhaltigkeit als zentraler Treiber der H₂-Wirtschaft

- Durchführung von Lebenszyklusanalysen (LCA; sLCA; LCC) als Bewertungsmethode der Nachhaltigkeit zur Abbildung des gesamten Lebenszyklus
- Untersuchung aller H₂-Produktionspfade hinsichtlich ihrer Treibhausgasemissionen und anderer Umweltwirkungen (LCA)
- Weiterentwicklung von sozialen Kriterien und Schaffung einheitlicher Datensätze im Bereich der sLCA zur transparenten Bewertung von Technologien
- Untersuchung der ökonomischen Nachhaltigkeit für Akteure und Systeme (LCC), wie für die Bewertung der Möglichkeiten zum Umgang mit externalisierten Kosten
- Studien zur Zahlungsbereitschaft für grünen H₂

Projektformate nach dem Vorbild der Reallabore der Energiewende

- Schaffen von Projektformaten zur Betrachtung der gesamten Wertschöpfungskette hinsichtlich Umweltkriterien und Ressourcen
- Integration des Projektendes und somit Aspekte der Kreislaufwirtschaft in die Konzepte von Projekten
- Weitere Stärkung transdisziplinärer Forschungsansätze auch in nicht-technische Bereich, wie Einbindung von Multiplikatoren und Pädagogen
- Integration der Möglichkeit von Aus- und Weiterbildung von Fachkräften
- Citizen Science Projekte zur Einbindung und Weiterbildung von Bürgern
- Sicherstellung von nachhaltigem Nutzen durch Fokus auf offene und für Interessierte zugängliche Datenbasis

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

AEL	Alkalische Elektrolyse (AFC: Alkaline Fuel Cell)
AEMEL	Alkalischer Membran-Elektrolyse
BZ	Brennstoffzelle (FC: Fuel Cell)
CCS	CO ₂ -Abtrennung und Speicherung (Carbon Capture and Storage)
CCU	CO ₂ -Abtrennung und Nutzung (Carbon Capture and Utilization)
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
DME	Dimethylether
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EL	Elektrolyse
FuE	Forschung und Entwicklung
GW	Gigawatt
H ₂	Wasserstoff
HT	Hochtemperatur
HTEL	Hochtemperaturelektrolyse
KI	Künstliche Intelligenz
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
LCA	Life Cycle Assessment
(s)LCA	soziale Lebenszyklusanalysen (Social Life Cycle Assessment)
LCC	Lebenszykluskostenrechnung (Life Cycle Costing)
LH ₂	Flüssigwasserstoff (Liquid Hydrogen)
LOHC	Flüssige organische Wasserstoffträger (Liquid Organic Hydrogen Carriers)
MEA	Membran-Elektroden-Einheit (Membrane Electrode Assembly)
NWS	Nationale Wasserstoffstrategie
NH ₃	Ammoniak
PEMEL	Protonen-Austausch- oder Polymer-Elektrolyt-Membran-Elektrolyseur
QRA	Quick Reaction Alert beziehungsweise Quantitative Risk Assessment
RCS	Sicherheit, Normung und Standardisierung (Regulations, Codes and Standards)
TCO	Gesamtkosten des Betriebs (Total Cost of Ownership)
THG	Treibhausgas
TRL	Technologischer Reifegrad (Technology Readiness Level)
VKM	Verbrennungskraftmaschine



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages