

**FORSCHUNGSNETZWERK WASSERSTOFF
EXPERTENEMPFEHLUNG 2025
VON DER FORSCHUNG IN DIE ANWENDUNG**





WASSERSTOFF

FORSCHUNGSNETZWERKE
ENERGIE

Impressum

Herausgeber

Projekträger Jülich (PtJ)
Forschungszentrum Jülich GmbH
52425 Jülich

Redaktion und verantwortlich für den Inhalt

Forschungsnetzwerk Wasserstoff

Gestaltung und Produktion

Projekträger Jülich (PtJ)
Forschungszentrum Jülich GmbH
5425 Jülich

Stand

Mai 2025

Bildnachweise:

Titel: ©SmirkDingo – stock.adobe.com; S. 7: Fraunhofer ISE; S. 11, 12: EWE AG; S. 14: thyssenkrupp Steel Europe AG;
S. 16: Bosch Zentrale; S. 19: Deemerwha studio – stock.adobe.com; S. 20: TU Darmstadt; S. 21: Siemens Energy

Die Inhalte der Expertenempfehlung 2025 wurden beim Netzwerktreffen des Forschungsnetzwerks Wasserstoff am 26./27.11.2024 in Berlin von den Mitgliedern zusammengetragen. Die Publikation ist im Anschluss in einem interaktiven Dialogprozess maßgeblich von den Clustersprecher:innen und von den Mitgliedern des Forschungsnetzwerks Wasserstoff erstellt worden.

Die Clustersprecher:innen möchten sich bei den Themenpaten, AG-Moderator:innen und Teilnehmenden der Veranstaltung und des Konsultationsprozesses ausdrücklich bedanken, ohne deren Engagement es nicht möglich gewesen wäre, diese Publikation zu erstellen.



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

INHALT

	Zusammenfassung	3	
1.	Erzeugung von Wasserstoff und Folgeprodukten	6	
2.	Infrastruktur und Systemintegration	10	
3.	Nutzung	14	
4.	Sicherheit, Akzeptanz und nachhaltige Markteinführung	18	
5.	Kraftwerke und Turbomaschinen	20	
	Abkürzungsverzeichnis	24	



Erzeugung von Wasserstoff und Folgeprodukten



Infrastruktur und Systemintegration



Nutzung



Sicherheit, Akzeptanz und nachhaltige Markteinführung



Kraftwerke und Turbomaschinen

Wasserstoff und seine Derivate sind entscheidende, für Energiesicherheit, die klimaneutrale Industrie und weitere schwer elektrifizierbare Anwendungen unverzichtbare Bausteine der Energiewende. Der jährlich erscheinende World Energy Outlook der internationalen Energieagentur macht seit 2020 zunehmend deutlich, dass die saisonale Energiespeicherung für eine resiliente Stromerzeugung sowie die Dekarbonisierung und Defossilisierung der Industrie ebenso wie des Flugzeug-, Schifffahrts- und Schwerlastverkehrs die Haupt-Einsatzgebiete für regenerativen Wasserstoff und „grüne Moleküle“ darstellen. Die EU und auch der nationale Gesetzgeber haben seitdem folgerichtig wichtige regulatorische Rahmenbedingungen für die Erzeugung und Verwendung von Wasserstoff im Energiesektor, in der Industrie und im Verkehrssektor verhandelt, beschlossen und in Kraft gesetzt.

Mit dem Beschluss zum Bau des Kernnetzes ist in 2024 ein weiterer bedeutender Meilenstein gesetzt worden. Das Kernnetz bildet den Backbone der Wasserstoffwirtschaft und ist notwendige Voraussetzung für die Umsetzung im Industriemaßstab. Es verbindet Zentren der Erzeugung und des internationalen Handels mit Großspeichern und industriellen Großverbrauchern und Weiterverarbeitern.

Auch in der Forschung wurden große Maßnahmen ergriffen: Die Wasserstoff-Leitprojekte und -Reallabore bündelten und vernetzten Kompetenzen, die IPCEI-Förderung der Europäischen Union bildete den Rahmen für große Schlüsselprojekte. Das 8. Energieforschungsprogramm und, ergänzend dazu, die Förderung internationaler Wasserstoffprojekte sowie die EU-Förderprogramme waren und sind für die aktuelle Phase in der Wasserstoffforschung verfügbar und ermöglichten bereits hochrelevante und wegweisende Forschung hinsichtlich innovativer Technologie, beispielsweise bei der Wasserstoffherzeugung, -speicherung und -rückverstromung sowie der Massentauglichkeit von Wasserstofftechnologien und der Offshore-Produktion.

Dieses Momentum muss nun unbedingt aufrechterhalten werden. Veränderte internationale Rahmenbedingungen erfordern allerdings auch in der Wasserstoffwirtschaft und -forschung nochmals beschleunigende Maßnahmen, um neue Impulse für die kurzfristige Adaption dieser Zukunftstechnologien zu ermöglichen.

Um diesen Prozess inhaltlich zu unterstützen, hat das Forschungsnetzwerk Wasserstoff seine im September 2021 erstmals erschienene Expertenempfehlung überarbeitet, welche den Forschungsbedarf entlang der gesamten Wertschöpfungskette der Wasserstoffwirtschaft zusammenfasst. Die hiermit vorliegende Version wurde in einem interaktiven Dialogprozess von den Mitgliedern des Forschungsnetzwerks Wasserstoff erstellt und enthält aktualisierte Forschungsempfehlungen aus dem Dialog zwischen Wissenschaft und Industrie. Unabhängig von den konkreten Inhalten plädiert das Netzwerk im Hinblick auf die Forschungsförderung für eine ausgewogene Mischung von Kontinuität und neuen, stärker transferorientierten Werkzeugen, wobei insbesondere auch die Möglichkeit internationaler Kooperationen erleichtert werden sollte.

Zudem ist es insbesondere für die forschenden Unternehmen essenziell, dass parallel zur Weiterentwicklung der Technologien auch eine geeignete Regulatorik existiert, die einen schnellen initialen Hochlauf auf Basis bereits existierender Lösungen ermöglicht. Hierfür haben sich aus verschiedenen Forschungsprojekten bereits Schlussfolgerungen ziehen lassen: Zusammen mit neu entwickelten Anreizsystemen für die industrielle Nutzung beispielsweise über Leitmärkte, einer Deregulierung der grünen Wasserstoffherzeugung, die dem parallelen Ausbau von Elektrolyseuren, Infrastruktur und erneuerbarer Erzeugung Raum zum Atmen lässt und langfristig verlässliche und tragfähige Rahmenbedingungen schafft, ist der Übergang in die Massenproduktion und der Eintritt in die Phase der wirtschaftlichen Verwertung und weiten Verbreitung greifbar. Nur mit verlässlichen politischen Leitplanken, pragmatischen Qualitätsanforderungen, eingespielten Zertifizierungssystemen sowie funktionierenden nationalen und internationalen Märkten und Handelsplattformen wird ein schneller und für Energiesicherheit und Klimaschutz notwendiger Markthochlauf gelingen.

Eine solche Strategie, mit der Europa wieder Technologieführerschaft erlangen, nachhaltiges Wachstum auf Basis gut ausgebildeter Fachkräfte sichern und Energie- sowie Technologiesouveränität erhalten und ausbauen kann, kann Grundstein einer erfolgreichen europäischen Industriepolitik des 21. Jahrhunderts werden.

Forschungsnetzwerk Wasserstoff

Das Netzwerk besteht aus fünf Clustern, die sich in Arbeitsgruppen unterteilen.



Grüner H₂:
Biomasse &
biogenen
Reststoffen
alternative
Herstellung

Methan,
Methanol,
Ammoniak, Olefine,
Ether. Synth.
Kerosine, Diesel &
Ottokraftstoffe

Integration
ins Energiesystem
mit Strombezug

Turbomaschinen

UNG
FOLGE-
KTEN

**KRAFTWERKE
UND
TURBOMASCHINEN**

Kraftwerke

Transport-
Infrastruktur
für straßen-, schiffs-
und schienenge-
bundenen
H₂-Transport

Gesamtsystem-
integration
und
-modellierung

**INFRASTRUKTUR
UND SYSTEM-
INTEGRATION**

Pipelinetransport
Verteilernetze

Mobil:
LKW, NFZ,
Personenverkehr,
Seifahrt,
Luftverkehr

Mittel-
und großskalige
H₂-Speicherung

Pipelinetransport
Fernleitungsnetze

1. ERZEUGUNG VON WASSERSTOFF UND FOLGEPRODUKTEN

Im Cluster 1 "Erzeugung von Wasserstoff und seinen Folgeprodukten" sind etwa 30-40 Partner aus Wissenschaft und Industrie organisiert, welche sich regelmäßig zum Stand der Technik, neuesten Entwicklungen und Herausforderungen austauschen. Im Folgenden werden die wichtigsten Erkenntnisse und Empfehlungen zu den im Cluster 1 auf dem FNEH2-Netzwerktreffen 2024 diskutierten Leitfragen zusammengefasst:

- Welche Forschungsschwerpunkte stehen aktuell im Vordergrund, um den Hochlauf einer Wasserstoff-Wirtschaft zu voranzutreiben?
- Was sind aktuell die größten Hemmnisse für den Hochlauf der Wasserstofftechnologien?
- Welche Empfehlungen geben die Partner des FNE an politische Entscheider?

Forschungs- und Entwicklungsbedarfe

Bei den Forschungsschwerpunkten für die Herstellung von Wasserstoff und seinen Folgeprodukten haben sich die Prioritäten der letzten Jahre weiterentwickelt: Im Themenkomplex ‚Prozesse und Materialien‘ muss die Entwicklung neuer Katalysatoren und Funktionsmaterialien vorangetrieben werden, sowohl für Elektrolyse als auch für thermochemische Herstellungsprozesse. Für Elektrolyseure konnten Elektrodenstrukturen weiterentwickelt und verbessert werden, wie zum Beispiel die Reduzierung der Edelmetall-Beladung bei gleichzeitiger Beibehaltung hoher Stromdichten. Nach wie vor bleibt es jedoch das Ziel, die Herstellkosten von Anlagen zur Wasserstoffherzeugung zu senken und den Betrieb effizienter und langlebiger zu gestalten. Explizit genannt wurde für die Elektrolyse auch die Erweiterung des Betriebsfensters, u.a. der Druckbetrieb und der Ko-Elektrolyse-Betrieb, bis hin zu reiner CO₂-Elektrolyse für die SOEL-Technologie. Für chemische Wasserstoffträger, sowohl strombasierte PtX-Produkte als auch biomassebasierte BtX-Produkte, muss die Gesamteffizienz der Produktionsprozesse erhöht werden. Dies erfordert die weitere Optimierung der Downstream-Prozesse, inklusive der Bereitstellung geeigneter Kohlenstoffquellen (z. B. über CO₂ oder biogenen Kohlenstoff). Ein weiteres wichtiges Thema für alle Verfahren ist die Forschung an Substitutionsmöglichkeiten für per- und polyfluorierte Materialien (PFAS), die an verschiedenen Stellen der Prozesskette heute noch benötigt und eingesetzt werden. Dies betrifft in besonderem Maße die PEM-Elektrolyse, aber auch andere Verfahren und deren Vorketten.

Auf der ‚Systemebene‘, insbesondere für Elektrolyseure, wurden in den letzten Jahren merkliche Fortschritte in der Hochskalierung der Technologien erzielt, sowohl beim Scale-up der Stacks als auch beim Numbering-Up der Systeme. Dies gilt ebenso für die Wasserstoffherzeugung aus biogenen Reststoffen und die Herstellung synthetischer Folgeprodukte. Es wurden sowohl BtX-Pilotanlagen zur Wasserstoffherzeugung als auch PtX-Anlagen, wie zur Herstellung von Sustainable Aviation Fuels (SAF) hochskaliert und demonstriert. Besondere Bedeutung wird dabei den Folgeprodukte Methanol und Ammoniak beigemessen: Methanol, weil es besonders gut handhabbar ist und ein grünes Plattform-Molekül darstellt. Ammoniak, weil dieser als chemischer Energieträger keinen Kohlenstoff enthält und ebenfalls ein wichtiger Ausgangsstoff ist.

Für alle genannten Technologien ist jetzt notwendig, automatisierte, idealerweise ‚intelligente‘ Condition-Monitoring-Systeme zu entwickeln, die den Zustand der Anlagen überwachen. Die Anlagen müssen umfassend im Feld erprobt und die Ergebnisse mit Labordaten von Stacks und Reaktoren abgeglichen werden. Damit sollen Wechselwirkungen und Effekte der Systemkomponenten auf die Leistung und Langzeitstabilität besser verstanden werden. Gegenstand der Forschung sollen insbesondere auch Arbeiten an großen Systemen im industriellen Maßstab sein, in denen z. B. Degradationsmechanismen untersucht und besser verstanden werden, die sich bisher nur bedingt aus dem kleinen in den großen Maßstab übertragen lassen. Ziel ist es, die Lebensdauer der Anlagen zu verlängern und die Wartungsintervalle zu optimieren, dabei aber ein ‚Over-Engineering‘ zu vermeiden.

Im Bereich ‚Systemintegration‘ steht aktuell der netz- sowie systemdienliche Betrieb von Elektrolyseuren und hybriden Anlagen mit nachgelagerten thermochemischen Prozessen für Folgeprodukte im Vordergrund, vor allem unter dynamischen Bedingungen wie sie sich durch den Betrieb mit volatiler erneuerbarer Strom ergeben. Für die Erprobung gesamter Prozessketten inkl. der Strombereitstellung, der Herstellung und Speicherung des Wasserstoffs und dessen Folgeprodukte, sind Umsetzungsprojekte unter für realen Anwendungen notwendig. Damit soll der gesamte Lebenszyklus durchlaufen werden, von der Herstellung und Qualitätskontrolle, über Genehmigungsprozesse, Inbetriebnahme und Regelbetrieb inkl. Wartung und Optimierung der Betriebsführung bis zum Rückbau und Recycling der Systeme. Darin müssen weitergehende Themen wie Standardisierung, Zertifi-



zierung und Geschäftsmodellentwicklung eingeschlossen sein und die Konzepte hinsichtlich ihrer Wirksamkeit zur Reduktion von Treibhausgasen bewertet werden.

Als übergreifende Themen wurden die aktuell noch hohen Kosten für zahlreiche Wasserstoff-Technologien genannt und dazu ermutigt, zukünftige F&E-Aktivitäten auf deren Potenzial einer Kostensenkung auszurichten. Um insgesamt kosteneffizient den Wasserstoff-Hochlauf zu gestalten, wird trotz des technologieoffenen Ansatzes eine Priorisierung angeregt, um besonders erfolgsversprechende Technologien schnell in den industriellen Transfer bzw. Umsetzung zu bringen und so den Wasserstoff-Hochlauf zu stimulieren.

Ein weiteres wichtiges übergreifendes Thema ist der Einsatz und die Nutzung künstlicher Intelligenz in der Forschung und Entwicklung von Wasserstofftechnologien. Ihr Potenzial muss gewinnbringend eingebracht werden, beispielsweise für eine Beschleunigung der Materialentwicklung, zur besseren Vorhersage von Lebensdauern und Wartungserfordernissen von Anlagen oder auch zur effizienteren System- und Netzintegration.

Was steht aktuell dem Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft im Wege? Folgende Hemmnisse wurden von den Expertinnen und Experten identifiziert und Vorschläge zu deren Beseitigung unterbreitet: Seitens der Regulatorik sind die Nachhaltigkeitskriterien für grünen, strombasierten Wasserstoff (enge zeitliche und örtliche Korrelation der Stromgewinnung) sehr strikt und haben das Potenzial, die Herstellung von grünem Wasserstoff in Deutschland und der EU in der Hochlaufphase zu hemmen. Es wird empfohlen, pragmatische Lösungen für den Markthochlauf mit ausreichend langen Investitionszeiten zu ermöglichen, um die Hochskalierung der Technologien und Infrastrukturen zu fördern und die aktuell noch hohen Kosten der Wasserstoffherstellung zu senken. Ein weiterer regulatorischer Unsicherheitsfaktor sind die angedachten Restriktionen von PFAS-Materialien, die nicht nur in der Elektrolyse verwendet werden, sondern kritisch für die gesamte chemische Industrie sind. Realistische Übergangsfristen sind notwendig, um Investitionsentscheidungen für Umsetzungsprojekte nicht zu erschweren. Dennoch besteht Konsens im Netzwerk, dass die Substituierung fluorierter Substanzen energetisch vorangetrieben werden muss.

Der Dialog im FNE-Netzwerk wird von allen Beteiligten positiv gesehen, das Netzwerk als ausgesprochen nütz-

liche empfunden und es besteht der Wunsch, den Austausch noch weiter auszubauen und zu fördern. Insbesondere sehen die Experten Potenziale, um Synergien zu heben, indem Vertreter des Netzwerks im Sinne einer ‚Technologieplattform‘ Informationen zusammenstellen, den (weltweiten) Stand der Technik und der Umsetzung monitoren und offene Fragen identifizieren. Dies würde den Partnern des Netzwerks viel Mehrfacharbeit der Recherche sparen und die Vernetzung fördern, wenn sich neue Partnerschaften zur Bearbeitung solcher Forschungsfragen finden. Es besteht Einigkeit, dass dies ein eigenes Projekt darstellt und nicht im Ehrenamt bearbeitet werden kann.



Erprobung von industriellen Druckverfahren zur Herstellung von Katalysatorschichten für die Membran-Elektrolyse.

Als Resultat des fachlichen Austauschs geben die Experten aus dem Bereich ‚Herstellung von Wasserstoff und Folgeprodukten‘ folgende Empfehlungen an politische Entscheider:

- Die Farben des Wasserstoffs sind anschaulich, aber es ist in der Praxis wesentlich sinnvoller, den Wasserstoff nicht an sein Herstellverfahren, sondern in Analogie zum Strom an seine spezifischen CO₂-Emissionen zu koppeln und damit seine Nachhaltigkeit quantitativ zu erfassen und zu intensivieren (Wasserstoffmix, analog zum Strommix).
- Schaffung von technologieoffenen Anreizmechanismen bzw. Förderprogrammen, die anhand der Kosten zur Vermeidung von CO₂-Emissionen

gemessen werden und somit durch ein breiteres Technologieportfolio zur Risikominimierung und mehr Resilienz beitragen.

- Für den Hochlauf sind Umsetzungsprojekte im industriellen Maßstab erforderlich mit begleitender Forschung, um maximale Lerneffekte und Betriebserfahrung zu ermöglichen und alle vermeidbaren Fehler und Versagensmechanismen aufzudecken.
- In der Phase des Markthochlaufs dürfen Investitionen und der Aufbau einer komplexen Infrastruktur nicht an zu strikten Strombezugs-kriterien scheitern, da ansonsten die Economy of Scale zu spät erreicht wird, um die Kosten zu senken. Ein pragmatisches Vorgehen beschleunigt die Umsetzung, was sich positiv auf die Marktchancen beim späteren Technologieexport auswirkt.
- Wichtig ist ein sicherer regulatorischer Rahmen, der eine Investitionssicherheit garantiert. Bei Übergangslösungen, z. B. RED III, PFAS-Verbot, muss daran gedacht werden, dass große Anlagen für Jahrzehnte geplant werden. Vereinfachungen mit Übergangfristen von nur wenigen Jahren helfen bei der Umsetzung weniger.
- In Zeiten knapper Kassen muss eine Priorisierung gefunden werden. Vorgeschlagen werden als Kriterium der Impact auf die NWS-Ziele inklusive Importstrategie und ‚Sprinter-Ziele‘.

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. In 2024 sind mit der Verabschiedung des Wasserstoffkernnetzes und dem Start der IPCEI Infrastrukturprojekte wichtige erste Schritte für eine kommerzielle Wasserstoffinfrastruktur gemacht worden. Ausgehend von dieser ersten Basis muss aber weiterhin eine zielgerichtete und zwischen den verschiedenen Wertschöpfungsstufen abgestimmte Gestaltung der Transport- und Speicherinfrastruktur erfolgen. Nur so können Engpässe, Verzögerungen, aber auch Überkapazitäten von vornherein vermieden werden, um Wasserstoff kosteneffektiv ins Energiesystem zu integrieren.

Weiterhin liegt ein besonderer Fokus auf dem effektiven Zusammenwirken der Strom- und Gas- beziehungsweise H₂-Infrastruktur, um das Potenzial des Wasserstoffs zur Flexibilisierung und Defossilisierung des Gesamtsystems vollumfänglich nutzen zu können. 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. Mit den ersten kommerziellen Umsetzungsprojekten gilt es einen zusätzlichen Fokus auf die Anschlussfähigkeit für Folgeprojekte und den Wissenstransfer zu legen.

Einordnung der Forschungs- und Entwicklungsbedarfe

Mit den ersten marktnahen Großprojekten im Bereich der Wasserstoffinfrastrukturen werden die bestehenden Forschungs- und Entwicklungsbedarfe um verschiedene Aspekte ergänzt oder angepasst:

- Gesamtsystematischer Ansatz steht weiterhin im Fokus, nun aber mit spezifischerem Blick auf Interoperabilität und weiteren Systemkomponenten wie bspw. Wasser oder Wärme
- Ausgehend von zeitnaher Umsetzung und Markteintritt gibt es das Bestreben, Wissenstransfer aus ersten Marktprojekten sicherzustellen

- Kompatibilität/Interoperabilität/Standards und Normungen sind weiterhin relevantes Thema, verstärkt wird aber sowohl die globale als auch die regionale Perspektive erwähnt
- Finanzierung und Risikoabsicherung von Wasserstoffinfrastrukturprojekten wird zunehmend eine relevante Fragestellung

Nachfolgend werden die spezifischen Forschungs- und Entwicklungsbedarfe für die Wertschöpfungsstufen Straßen- und Schienentransport, H₂-Netze und H₂-Speicher, sowie für die Gesamtsystemmodellierung dargestellt.

Transport und Infrastruktur

- Technische Entwicklung von H₂-Transporttechnologien (wie Flüssigwasserstoff (LH₂), Druckwasserstoff (CH₂), synthetische Kraftstoffe, LOHC, Metalle und ihre Hydride, Ammoniak/Methanol als H₂-Träger) bei fortlaufender techno-ökonomischer Analyse der unterschiedlichen Prozesspfade anhand spezifischer Use-Cases und Demonstrationsvorhaben
- Optimierung der Infrastrukturen für übergeordneten Transport (z. B. Netze, Schiene), insbesondere auch mit Blick auf die „letzte Meile“ und die Anbindung stofflicher Großverbraucher
- Entwicklung der Ökosysteme Hafen und Flughafen sowie deren Anbindung an übergeordnete Infrastrukturen
- 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 der Elemente der Prozesskette, wie z. B. von Druckgefäßen auf Straße, Schiene und Wasserstraße
- Methodenentwicklung zur zerstörungsfreien Prüfung von H₂-Komponenten, wie z. B. Speicher (Materialprüfung) sowie die H₂-Qualitätssicherung



H₂-Netze

- Analyse der bestehenden Verteilnetze und der Nutzerstruktur zur Identifikation kosten- und zeitoptimierter Transformationspfade für Privat- und Industrieverbraucher
- Kontinuierliche Netzentwicklungsplanung, auch im Hinblick auf die Interaktion zwischen Speichern und Netzen, Resilienz Aspekte, mögliche CO₂-Netze und internationale Übergabepunkte
- 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 einschließlich der Qualifizierung der Materialien
- Entwicklung sicherer Umstellungsprozesse und Strategien für die Transformation konventioneller Gasnetze hin zu Wasserstoffnetzen bzw. deren Anbindung an das Kernnetz.
- Materialforschung zu den in Bestandsanlagen verbauten Materialien zur (Nach-)Qualifizierung/ Festlegung von Einsatzbereichen bei Betrieb mit Wasserstoff
- Sensorik zur Überwachung der H₂-Reinheit und von Leckagen im Betrieb



Absenkung eines Rohrabschnitts

- 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 Anforderungen des H₂-Transports mit entsprechend hohen Förderleistungen.
- Kontinuierliche Evaluierung der Netztopologie im Hinblick veränderte Bedarfe, z. B. zusätzliche Einspeise- und Anlandepunkte im Binnenland
- Weiterentwicklung der Netzentgelte-Systematik, zukünftige Finanzierung von (Verteil-)Netzen
- Zugang zu H₂ in Regionen fernab des Kernnetzes, dezentrale Microgrids

H₂-Speicher

- Verriefte Konzeptionierung von geologischen Speichern und Entwicklung von Transformationsstrategien zu H₂-Speichern (Salzkavernen und Porenspeicher). Dabei sind verschiedene Themenaspekte wie Mikrobiologie, Eignungsprüfung von unter- und obertägigen Komponenten, Zementation/Komplementierung und Gasreinigung zu berücksichtigen.
- Erarbeitung von Maßnahmen zur Qualifizierung bestehender Speicher für H₂
- Entwicklung und Erprobung von Betriebsstrategien für H₂-Speicher, um die veränderten Randbedingungen in Bezug auf dynamische Fahrweisen und thermodynamische Eigenschaften zu berücksichtigen. In diesem Zusammenhang ist eine Analyse der zu erwartenden Betriebsführungsdynamik im Hinblick auf Marktmechanismen, Elektrolyse-Wasserstoffherzeugung etc. vorzunehmen. Dabei sollten die Betrachtungen der unterschiedlichen Rollen von H₂-Speichern (u.a. Strukturierung, Importabsicherung etc.) gerecht werden.
- Weiterentwicklung zur Anhebung der TRL von Porenspeichern, oberirdischen Hochdruck-, Feststoff-, LH₂- und anderen Flüssigspeichern

sowie chemischen Speichern und deren Zusammenspiel (multimodale Speicher) zur Erreichung der notwendigen Skalierung und Kostenreduktion

- Technologien zur Systemintegration von Wasserstoffspeichern in lokale Strom-, Gas- und Wärmenetze (Abwärme Elektrolyse, Speichieranlagen und Verdichter, Nutzung von Druckpotenzialen)
- Potenzielle Einbindung deutscher Kavernenspeicher in die europäische Wasserstoffinfrastruktur inkl. der H₂-Kraftwerke
- Nachhaltiger und beschleunigter H₂-Speicherneubau inklusive Solehandling
- Wirtschaftliche Optimierung der Obertageanlagen von Kavernen: Dimensionierung von Ein- und Ausspeicherung im Verhältnis zur Kapazität; Kosteneffiziente Aufreinigung H₂ nach Speicherung; Optimierung und Kostenreduktion von Verdichtertechnologien (z. B. Turboverdichter)

Gesamtsystem-Modellierung und Integration

- Entwicklung von Simulations- und Optimierungswerkzeugen sowie zugehörige Skalenübergänge für eine integrierte Systemplanung und effizienten Netzbetrieb 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 Wasserstoff-erzeugungs- und Rückverstromungsansätze (wie H₂-Kraft-Wärme-Kopplung (KWK), Kältenachnutzung bei LH₂)
- Open-Science-Modellierung der Transport- und Verteilnetze in Verbindung mit optimierenden Modellierungen zur ganzheitlichen Sektorenkopplung (Strom, H₂, grüne Kohlenwasserstoffe, Wärme, Klimatisierung) und der Energienachfrage (Mobilität, Logistik, Industrie, Gewerbe, Gebäude)
- digitale Architekturen und zugehörige Markt-designs zur dezentralen Sektorenkopplung

- Netzdienliche Ausgestaltung von Allokation und Betriebsführung der Elektrolyse-Kapazitäten, Ökonomische und ökologische Optimierung des Strombezugs der Elektrolyseure
- Leitplanken, Strategien und Roadmaps einer Gesamtsystemtransformation, Zielabwägung hinsichtlich teilweise konkurrierender Zielparame-ter, z. B. ökonomisches Optimum versus Resilienz versus realistisches Akteursverhalten
- Finanzierung und Märkte für H₂: Untersuchungen zu realistischen Abnahmemengen, zur Priorisierung von Sektoren, Netzentgelten, Wechselwirkung des Wasserstoffsektors mit den Strommärkten, Preise versus Kosten, Marktdesign und Regulatorik im Transformationsprozess
- Internationale „Round Robin“-Projekte für systemanalytische und technische Modellierung der Wasserstoff-Infrastrukturen



Wasserstoffspeicher Kavernenplatz

3. NUTZUNG

Die stoffliche und energetische Nutzung von Wasserstoff wird in allen Sektoren geprüft und birgt ein enormes Potenzial zur Reduktion von Treibhausgasemissionen. Prinzipiell kann Wasserstoff überall dort eingesetzt werden, wo heute fossile Brennstoffe genutzt werden. Die technische Reife variiert jedoch deutlich, einige Anwendungen sind bereits industrialisiert, wohingegen andere erst in einigen Jahren Serienreife erreichen werden.

Die Förderung der stofflichen und energetischen Nutzung von Wasserstoff hat in kurzer Zeit beachtliche Wirkung entfaltet und Erfolge erzielt, welche sich grob in drei Kategorien einteilen lassen:

a) Aufbau von Strukturen und Netzwerken: Mittels der Nationalen Wasserstoff Strategie wurde ein politischer Rahmen und klare Ziele für die Wasserstoff-Förderung auf nationaler Ebene definiert. Die H2Global Stiftung leistet einen wertvollen Beitrag bei der internationalen Vernetzung von den Forschungsaktivitäten und der sichert Zugang zu dem globalen Wasserstoffmarkt. Der Fokus auf die gesamte Wasserstoffwertschöpfungskette hat bereits zu erheblichen Investitionen in Deutschland geführt. Die Planung und der gestartete Ausbau des Wasserstoff-Kernnetze schafft exzellente Voraussetzungen von Wasserstoff als Energieträger ohne Treibhausgasemission.

b) Technologieentwicklung und Demonstratoren: Durch zahlreiche Projekte in Forschung und Entwicklung konnte unter anderem die technologische Reife von Elektrolyse und Brennstoffzellentechnologie bis zur Marktreife vorangetrieben werden. Die Fördermittel ermöglichten die Realisierung zahlreicher Demonstrationsprojekte im Energie-, Industrie- und Mobilitätssektor die sich im Alltagsbetrieb bewähren und wertvolle Daten liefern. Im Mobilitätssektor konnte durch ein entstehendes H₂-Tankstellennetz Infrastruktur bereitgestellt werden, um nennenswerte Transportleistungen bei ÖPNV, Verteiler- und Lieferverkehr aus Wasserstoffbasis zu ermöglichen.

c) Internationale Kooperationen: Die vorhanden politische Unterstützung ermöglichte bilaterale und multilaterale Abkommen, welche Deutschland eine Teilnahme am internationalen Wasserstoffhandel sichern und in der internationalen Technologieentwicklung fest verankern.



Bau der Direktreduktionsanlage in Duisburg-Schwegern

Anwendungsfeldübergreifender Handlungsbedarf für die Politik

- Die bisherige Förderung hat die Grundlagen gelegt, aber der Erfolg der Wasserstoffstrategie hängt maßgeblich von der Umsetzung der nächsten Schritte ab, insbesondere in Bezug auf Kostensenkung, Infrastrukturausbau und Schaffung von Planungssicherheit.
- Erzeugung von Skaleneffekten durch gezielte Förderung der Serienfertigung von Schlüsselkomponenten einer Wasserstoffindustrie
- Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit von H₂ ggü. konventionellen Energieträgern beispielsweise durch Förderung CO₂ äquivalenter Preisvorteile
- Gezielter Ausbau der Wasserstoff-Transportinfrastruktur überregional und regional
- Förderung regionaler Wasserstoff-Ökosysteme, die Produktion, Transport, Speicherung und Anwendung von Wasserstoff integrieren, bei gleichzeitigem Ausbau der Tankstelleninfrastruktur entlang von Transport-/Transitrouten.
- Planungssicherheit und Absicherung von Investitionskosten durch eine klare, langfristige, verbindliche, technologieoffene Wasserstoffstrategie



- De-Regulierung mit Fokus auf Bürokratieabbau, Förderung von Innovationen und Beschleunigung des Markthochlaufs der Wasserstoffwirtschaft. Dies betrifft Genehmigungsprozesse für H₂ basierte Vorhaben, bei H₂ Transport und Verteilung sowie H₂-Anwendungen.

Anwendungsspezifischer Handlungsbedarf für die Politik:

Industrie: Stofflicher Einsatz, insbesondere in der Prozess-industrie

- Stoffliche Nutzung von H₂ mit anderen Anwendungen zusammendenken, Sektorkopplung fördern
- Regulatorik zur Definition grüner Eigenschaften vereinfachen
- Klimaziele realistisch auf die beteiligten Sektoren herunterbrechen
- H₂ als Träger für Plasmabasierte Prozesse entwickeln
- Rahmen für niedrige Strompreise schaffen
- Die Industrie dabei unterstützen, beim Technologiehochlauf für Stabilität und Akzeptanz zu sorgen
- Forschung zu Stromnetzdienlichem Verhalten/ Steuerung intensivieren
- Über F&E potenzielle Technologierisiken identifizieren und für Anwender mitigieren
- Herunterbrechen des EU-Ziels, den Einsatz grüner Technologien in den Teilnehmerstaaten zu erreichen.

Industrie: Energetische Nutzung für Prozesswärme und -dampf

- Rahmenbedingungen klären, Demonstratoren ermöglichen
- H₂-Verfügbarkeit und Preise verbessern
- Risiken für den H₂-Einsatz für KMU und Mittelstand eindämmen
- Leistungen für die Systemintegration bereitstellen

- Infrastruktur/Beratung bei der Umstellung von Erdgas zu H₂ bereitstellen
- neben dem Einsatz von grünem auch blauen Wasserstoff ermöglichen
- Infrastruktur und Rahmenbedingungen für CCS bereitstellen
- Einsatzeffekte von H₂ auf Erwärmungsgut und Öfen klären
- Brennstoff-Mix und Einsatz von Derivaten wie NH₃ untersuchen

Stationärer Einsatz von Wasserstoff in Gewerbe, Industrie und Haushalte

Technologisch

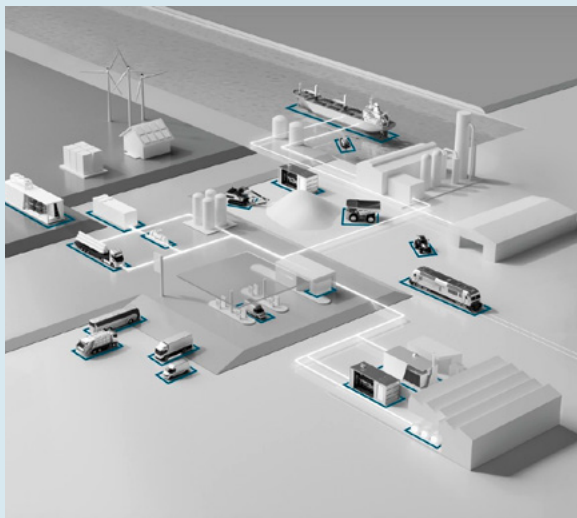
- Optimierte, kostengünstige Betriebsführung und Überwachung des Verbrennungsprozesses beim Einsatz reinen Wasserstoffs
- Zustandsüberwachung, interoperable Systemtechnik und lebensdauerschonender netzdienlicher Wasserstoff-Betrieb

Ökonomisch/Regulatorisch

- Verlässliche regulatorische und technologie-offenen Rahmenbedingungen schaffen sowie Implementierung von nachhaltigen Förderkonzepten
- Ableitung von wirtschaftlich/ sozialökologisch sinnvollen H₂ Anwendungsfällen in Verbindung mit auf Strom basierenden Technologien
- Skalierung in großvolumige Industrialisierung inkl. des Aufbaus einer Zuliefererlandschaft zur Reduktion der Herstellkosten
- Ausweitung der Feldtests unter Realbedingungen
- Verlässliche Planung zur Verfügbarkeit von H₂ Infrastruktur, H₂ Mengen und H₂ Preisen

Mobiler Einsatz von Wasserstoff

- H₂-Preis senken
- Zuverlässigkeit verbessern und Wartungsbedarf verringern
- Nutzfahrzeug-Tankstellen-Infrastruktur schaffen
- Wasserstoff-Hochlauf incentivieren
- Fahrzeugkosten und Servicelandschaft verbessern
- Wettbewerb im Rahmen der Sektorkonkurrenz lösen
- Planungssicherheit für Investitionen schaffen
- Internationale Koordination über EU-Grenzen schaffen
- Wiederaufnahme KsNI-Förderung ermöglichen
- Deregulierung bei der Betankung sicherstellen



Wasserstoffnutzung der Zukunft - Lösungen und Services entlang der gesamten Wert-schöpfungskette für alle Fahrzeugsegmente.

4. SICHERHEIT, AKZEPTANZ UND NACHHALTIGE MARKTEINFÜHRUNG

Motivation

Neben den technischen Bereichen entlang der Wasserstoffwertschöpfungskette gibt es nicht-technische und technische Forschungs- und Entwicklungsbedarf, die sich über die gesamte Wertschöpfungskette erstrecken. Diese werden im Forschungsnetzwerk mit Cluster Sicherheit, Akzeptanz und nachhaltige Markteinführung adressiert.

Forschungs- und Entwicklungsbedarfe

Die Forschungs- und Entwicklungsbedarf der übergeordneten Querschnittsthemen lassen sich in die Kategorien Sicherheit, Akzeptanz, Normung, Markt und Nachhaltigkeit strukturieren. Im Folgenden werden die Bedarfe entlang dieser Kategorien erläutert.

Sicherheit

- Der Markthochlauf hat Fahrt aufgenommen und in vielen Projekten wurden umfassende Erfahrungen gesammelt. F&E-Bedarfe zu Sicherheitsfragen aus diesem Prozess müssen identifiziert und adressiert werden.
- Eine fortlaufende Entwicklung und internationale Harmonisierung der technischen Wasserstoffsicherheit sind Voraussetzungen für die nachhaltige Nutzung innovativer Wasserstofftechnologien in allen Sektoren.
- Kontinuierliche Fortschritte in der Wasserstoffsicherheit sind unverzichtbar, um Risiken zu minimieren, das Vertrauen der Öffentlichkeit dauerhaft zu stärken sowie konservative und teure Sicherheitslösungen zu vermeiden.
- Vorausschauende Forschung und Entwicklung zur Wasserstoffsicherheit ist nur durch öffentliche finanzielle Unterstützung zu erreichen.
- Es ist im öffentlichen Interesse, zur Bündelung, zielgerichteten Umsetzung und fachlichen Koordinierung der nationalen Aktivitäten zur Wasserstoffsicherheit eine übergeordnete unabhängige Struktur zu schaffen.
- Das sicherheitstechnische Know-How wurde bisher vorrangig für reine Wasserstofftechnologien erarbeitet, nicht jedoch für H₂-Derivate. Lücken müssen identifiziert und geschlossen werden.

Akzeptanz

- Für eine ausgewogene Öffentlichkeitskommunikation spielen die Entwicklung und Wirkungsbegleitung innovativer Formate in der Forschungskommunikation eine wichtige Rolle, welche zielgruppenspezifisch die Komplexität des Themas Wasserstoff verständlich und erfahrbar machen, dabei differenziert Möglichkeiten und Grenzen sowie bestehende Unsicherheiten im wissenschaftlichen Diskurs verdeutlichen. Gute Umsetzungsbeispiele verdeutlichen die Machbarkeit und unterstützen die Entwicklung positiver Narrative.
- Für die Risikowahrnehmung und -kommunikation sowohl in den Industrien als auch in der Öffentlichkeit ist eine offene Fehlerkultur eine relevante Größe. Transparenz über Ursachen und Maßnahmen stellt Verständnis über Zusammenhänge her und schafft Vertrauen in den sicheren Betrieb.
- Um die benötigten Fachkräfte der Zukunft für den Wasserstoffhochlauf zu sichern, bedarf es innovativer Ansätze und Bildungsstrategien, welche u.a. die Kompetenzen sowie das Interesse im MINT-Bereich fördern. Ausreichend Fachpersonal unterstützt die gelingende Umsetzung der Transformation und trägt auf diese Weise zur gesellschaftlichen Akzeptanz bei.
- Verteilungsgerechtigkeit ist ein relevanter Akzeptanzfaktor. Hierfür müssen Konzepte entwickelt und begleitet werden, wie proaktiv lokale Benefits, Wertschöpfung und finanzielle Beteiligung ermöglicht werden können.

Normung

- Grundsätzlich steht ein solides Normenwerk für Wasserstofftechnologien zur Verfügung, hierbei sind Unterschiede im Reifegrad in den unterschiedlichen Bereichen Erzeugung, Infrastruktur, Anwendung und Querschnittstechnologien zu erkennen.
- Insbesondere gilt es, offene Lücken zu schließen im Normenwerk für Derivate, Flüssig-Wasserstoff und Untertagespeicherung.
- Um deutsche Interessen auch in europäischen und internationalen Normungsgremien weiterhin



stark zu vertreten und die Führung nicht anderen Nationen zu überlassen, ist eine strategische Förderung von Expertenengagement in der Normung, insbesondere für die aktive Besetzung von europäischen und internationalen Sekretariaten, unabdingbar.

- Weiterhin bedarf es gezielter Förderung pränormativer Forschungsvorhaben als wichtige Grundlage für Normungsvorhaben um bestehende Lücken im Normenwerk rasch und effizient zu schließen

Markt

- Ein wesentlicher Forschungsbedarf im Kontext des Markthochlaufs von Wasserstoff entsteht aus der Analyse potenzieller industrieller Abwanderung im Kontext von u. a. Resilienz und Subventionsbedarfen. Eine strategische Positionierung wird durch Untersuchung von Auswirkungen, z. B. auf die nationale Wertschöpfungskette oder Arbeitsplätze, sowie eine Ableitung von Erkenntnissen unterstützt.
- Eine entscheidende Unterstützung des Wasserstoffmarkthochlaufs erfolgt durch die Schaffung von Transparenz in der Marktentwicklung, z. B. hinsichtlich der Preisgestaltung und Nachfrageentwicklung, indem bisherige Forschungsergebnisse konsolidiert werden. Das ermöglicht Investoren und Unternehmen fundierte Entscheidungen zu treffen und Risiken besser zu bewerten, wodurch das Vertrauen in den Markt gefördert und die langfristige strategische Planung für Unternehmen erleichtert wird.
- Darüber hinaus ist die Analyse und sinnvolle Ausgestaltung bestehender sowie ggfs. notwendiger Förderinstrumente unerlässlich. Dies betrifft sowohl das Design der Instrumente, z. B. die Investitionsabsicherung und die Differenzierung zwischen Betriebskosten (OPEX) und Investitionskosten (CAPEX), als auch die prozessuale Umsetzung der Instrumente, um den Zugang zu Fördermitteln zu erleichtern und Bürokratie abzubauen

Nachhaltigkeit

- Viele Studien im Kontext der Nachhaltigkeitsbewertung von Wasserstofftechnologien beschränken sich auf technoökonomische und

ökologische Analysen. Soziale Analysen sind nach wie vor eher selten. Hier besteht weiterhin Forschungsbedarf, um Nachhaltigkeit in allen drei Dimensionen (ökologisch, ökonomisch und sozial) zu bewerten.

- Forschungsbedarf besteht auch im Hinblick auf die systematische Einbindung von mehrdimensionalen Nachhaltigkeitsanalysen in die Produkt- und Systemoptimierung sowohl von einzelnen Komponenten als auch im Hinblick auf komplexer Wasserstoffgesamtsysteme



Energiekonzept für eine nachhaltige Umwelt und umweltfreundliche Industrie mit grünem Wasserstoff

- Forschungsbedarf besteht auch hinsichtlich der systematischen Aufbereitung bestehender Studien zu einer Metastudie, die bestehende Ergebnisse für politische Entscheidungsträger aufbereitet und unterschiedliche Technologien unter klar definierten Randbedingungen vergleicht. Aktuell existiert eine Vielzahl von Nachhaltigkeitsanalysen, die im Kontext der Forschungsförderung von Wasserstoffprojekten erstellt werden. Die zugrundeliegenden Daten sind vielfach nicht öffentlich zugänglich und die veröffentlichten Ergebnisse dieser Studien sind nicht vergleichbar, da Systemgrenzen, Detailgrad und Hintergrund unterschiedlich definiert werden. Auch fehlen vielfach saubere Unsicherheitsanalysen. Daher eignen sich solche Ergebnisse nur eingeschränkt für die Politikberatung
- Der Markthochlauf von Wasserstoffsystemen ist u.a. abhängig von der Akzeptanz der Bevölkerung. Hierzu bedarf es einer guten Aufklärung über Vor- und Nachteile der Technologie. Nachhaltigkeitsanalysen bieten hierfür eine gute Grundlage. Das bestehende Wissen bietet eine gute Grundlage für die Öffentlichkeitskommunikation. Forschungsbedarf besteht hier hinsichtlich geeigneter Methoden Wissenstransfers in die Gesellschaft.

5. KRAFTWERKE UND TURBOMASCHINEN

Motivation

Eine jederzeit zuverlässige Stromversorgung auch während Phasen geringer Verfügbarkeit von Wind- und Sonnenenergie ist von zentraler Bedeutung. Die Importabhängigkeit macht das deutsche Energiesystem zudem anfällig für Krisen und beeinträchtigt durch hohe Energiekosten auch die Wettbewerbsfähigkeit des Wirtschaftsstandorts Deutschland. Im Bereich der Kraftwerke und Turbomaschinen soll Wasserstoff zukünftig eine zentrale Rolle als chemischer Langzeitenergiespeicher übernehmen, um durch Rückverstromung trotz schwankender Stromproduktion durch Wind- und Sonnenenergie die Versorgung sicherzustellen. Aktuell bestehen jedoch noch einige Hindernisse, die einen breiten Einsatz der Wasserstofftechnologien und insbesondere deren kommerziellen Hochlauf erschweren.



Versuchsanlage der TU Darmstadt, links: Reaktorhalle, rechts: Gasaufbereitungsanlage mit nachgeschaltetem Synthesecontainer.

Hindernisse

Im Bereich der Forschung und Entwicklung neuer, innovativer Technologien sind die derzeitigen Förderprogramme häufig zu kurzfristig angelegt und es fehlt somit an Kontinuität und langfristiger Planbarkeit. Zusätzlich sind viele Programme mit bürokratischen Hürden verbunden, die insbesondere kleine und mittelständische Unternehmen vor große Herausforderungen stellen.

Für die Produktentwicklung bis zur vollständigen Marktreife fehlen klare und langfristige politische

Rahmenbedingungen, die den Unternehmen und Forschungseinrichtungen die Planungssicherheit geben, um die notwendigen Investitionen zu tätigen. Zudem sind regulatorische Vorgaben, wie beispielsweise die zulässigen Emissionen von Wasserstoffgasturbinen, häufig noch nicht auf die Anforderungen von Wasserstofftechnologien angepasst, so dass die spezifischen Entwicklungsziele nicht ausreichend definiert werden können.

Um die kommerzielle Nutzung und die sich daraus ergebende Skalierung der Wasserstofftechnologien in die Breite zu ermöglichen, ist der flächendeckende Ausbau von Wasserstoffverteilnetzen und -speichern eine grundlegende Voraussetzung. Zusätzlich müssen steuerliche Anreize, Einspeisevergütungen und weitere finanzielle Maßnahmen implementiert werden, um gegenüber den bestehenden Technologien konkurrenzfähig zu werden.

Forschungsbedarfe der Kraftwerkstechnik

Kraftwerkstechnologien

Die thermochemische Konversion, wie beispielsweise die Vergasung von Biomasse und Reststoffen, bietet eine nachhaltige Möglichkeit, erneuerbare Energien zu nutzen, um Wasserstoffderivate zu synthetisieren und gleichzeitig CO₂-Emissionen zu reduzieren. BECCS (Bioenergy with Carbon Capture and Storage) kann dabei helfen, Strom zu erzeugen und CO₂ zu binden, welches zur Synthetisierung kohlenstoffneutraler e-fuels oder als langfristige Einspeicherung (negative CO₂-Emissionen) zur Erreichung einer klimaneutralen Energieversorgung beiträgt. Um die Effizienz zu steigern und die Technologie kostengünstig zu machen, sind weitere Forschungsmaßnahmen erforderlich.

Energieträger

Wegen des vergleichsweise niedrigen volumetrischen Energiegehalts von Wasserstoff ist dessen Import sowie der Transport an Standorte, die nicht an eine Pipeline angeschlossen sind, eine Herausforderung. Metalle wie Eisen könnten eine von mehreren vielversprechenden Alternativen für die Energiespeicherung und -umwandlung darstellen. Sie lassen sich in Pulverform mit hoher Energiedichte leicht transportieren und durch Oxidation energetisch emissionsfrei nutzen. Die Rückgewinnung des Metalls durch Wasserstoffreduktion würde eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft ermöglichen.



Über die Forschung hinausgehende Bedarfe

Um die vorhandenen Kraftwerkstechnologien zeitnah nutzen zu können, müssen die entsprechenden Rahmenbedingungen geschaffen werden. Der Ausbau der geeigneten Infrastruktur für die Speicherung und den Transport von Wasserstoff muss vorangetrieben werden. Bestehende Kraftwerksstandorte mit deren Infrastruktur, Personal, Netzanbindung (für Strom und ggf. Wärme) und auch deren Einrichtungen wie Hilfs- und Nebenanlagen sollten genutzt werden. Großskalige Pilotprojekte zur Integration von Wasserstoff in bestehende und neu zu bauende Kraftwerke müssen unterstützt werden, um die Praxistauglichkeit möglichst frühzeitig zu belegen und um die Risiken einer flächendeckenden Markteinführung zu reduzieren. Ein geeignetes Marktdesign muss geschaffen werden, um dekarbonisierte Residuallastkraftwerke auch im Markt abrufen zu können und somit die Stromversorgung stetig und gezielt in Richtung einer vollständigen Dekarbonisierung zu überführen. Sektorübergreifende Lösungen müssen geschaffen werden.

Forschungsbedarfe der Turbomaschinentechnik

Wasserstoffgasturbinen

Wasserstoffgasturbinen sind wegen ihrer großen Leistungen und gleichzeitig hohen Betriebsflexibilität ein Schlüsselement für die Energiewende in Deutschland. Forschungsschwerpunkte sollten weiterhin auf den Grundlagen der Wasserstoffverbrennung, der Verbesserung der Flammenstabilität in der Brennkammer sowie dem Einfluss von Wasserstoff auf Material und Werkstoffe liegen. Um diese Wasserstoffgasturbinen zeitnah einzuführen und wirtschaftlich betreiben zu können, müssen sie kraftstoffflexibel betrieben werden. Daraus ergeben sich zusätzliche technische Herausforderungen bei der Entwicklung der entsprechenden Verbrennungstechnologien, welche ebenfalls gezielt mit Fördermitteln unterstützt werden sollten. Für die Umsetzung der Energiewende ist es zudem notwendig, dass der brennstoffflexible Betrieb nicht durch dagegensprechende Regeln und Anforderungen ausgeschlossen wird.

Wasserstoffkompressoren

Die nationale Erzeugung und der Import von Wasserstoff sowie dessen anschließende Verteilung über Pipeline-Netzwerke und ggf. auch eine Verflüssigung

sind zentrale Elemente der gesamten Wasserstoff-Wertschöpfungskette. Die damit verbundene Wasserstoffverdichtung kann großindustriell nur mithilfe von Turbo-Kompressoren erfolgen. Wegen der herausfordernden stofflichen Eigenschaften des Wasserstoffs besteht die Notwendigkeit, die vorhanden Technologien erheblich weiterzuentwickeln.



Einbau einer Siemens Energy SGT-400 Gasturbine (10 – 15 MW-Klasse) mit 0 bis 100% H₂-Verbrennungstechnologie für einen Demonstrationslauf im Rahmen des europäisch-geförderten Projekts HYFLEXPOWER

Über reine Wasserstoff-Anwendungen hinausgehende Forschungsbedarfe

Die Energiewandlung von Medien außer Wasserstoff in Turbomaschinen ist für die Strom- und Wärmeherzeugung, Speicherung, Flugtriebwerke, Aufladung von Motoren und viele weitere Industrieprozesse insbesondere für das Gelingen der Energiewende essentiell. Daher ist es wichtig, dass auch weiterhin diese nicht (direkten) H₂-Technologien weiterentwickelt und gefördert werden. Insbesondere sind die Technologien der Kompressoren und Expander für Speicher, industrielle Wärmepumpen, Elektrolyseure Power-to-X-Anlagen, Raffinerieprozesse, Verflüssigung, Gastrennung, Abscheidung und Medientransporte sowie die Aufladung von Gasmotoren- und Brennstoffzellensystemen essentiell.

Darüber hinaus sollten die Synergien bei der Technologieentwicklung für die Energieversorgung und die Luftfahrt genutzt werden und die Fördermechanismen dies auch entsprechend unterstützen.

Forschungsbedarfe für Methoden und Personenkompetenzen

Zusätzlich zu den genannten Produkttechnologien müssen die querschnittlichen numerischen und experimentellen Methoden und Werkzeuge zur Auslegung und Analyse weiterentwickelt werden. Gepaart mit einer exzellenten Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses kann damit der Standortvorteil in Deutschland aufrechterhalten werden. Gerade Verbundforschungsvorhaben zwischen Hochschulen bzw. Forschungseinrichtungen und Industrie eignen sich zur Weiterentwicklung dieser Methoden- und Personenkompetenzen und müssen daher ein Schwerpunkt der Forschungsförderung sein.



ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

AEL	Alkalische Elektrolyse (AFC: Alkaline Fuel Cell)
AEMEL	Alkalischer Membran-Elektrolyse
BECCS	Bioenergy with Carbon Capture and Storage (Bioenergie mit CO ₂ -Abscheidung und -Speicherung)
BHKW	Blockheizkraftwerk
BSZ/BZ	Brennstoffzelle (FC: Fuel Cell)
BtX	Biomass-to-X
CAPEX	Capital Expenditures (Investitionskosten)
CCS	CO ₂ -Abtrennung und Speicherung (Carbon Capture and Storage)
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
e-fuels	Electrofuel/Synfuels (strombasierte synthetische Kraftstoffe)
EU	Europäische Union
FuE	Forschung und Entwicklung
FNEH2	Forschungsnetzwerk Wasserstoff
H ₂	Wasserstoff
HLK	Heizungs-, Lüftungs- und Klimatechnik
KMU	Klein- und Mittelständige Unternehmen
KsNI	Klimaschonende Nutzfahrzeuge und Infrastruktur
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
LH ₂	Flüssigwasserstoff (Liquid Hydrogen)
LOHC	Flüssige organische Wasserstoffträger (Liquid Organic Hydrogen Carriers)
MINT	Mathematik, Informatik, Naturwissenschaften und Technik
NWS	Nationale Wasserstoffstrategie
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
OPEX	Operational Expenditures (Betriebskosten)
PEM	Protonen-Austausch- oder Polymer-Elektrolyt-Membran
PFAS	Sper- und polyfluorierte Alkylsubstanzen
PtX	Power-to-X
RED II	Renewable Energy Directive II (europäische "Erneuerbare-Energien-Richtlinie")
SAF	Sustainable Aviation Fuel
SOEL	Solid Oxide Electrolyzer Cell (Festoxid-Elektrolysezelle)
TRL	Technologischer Reifegrad (Technology Readiness Level)



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages